

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikovaná mechanika

Napět'ově-deformační analýza zábavní atrakce

Stress-Strain Analysis of Amusement Ride

Student:	Michal Piňos
Osobní číslo	PIN0073
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Piňos**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Napětově - deformační analýza zábavní atrakce**
Stress-Strain Analysis of Amusement Ride
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- Seznamte se s obsahem normy ČSN EN 13814 a vypracujte postup při napětově-deformační analýze zábavní atrakce,
- Na základě dodaného geometrického modelu zábavní atrakce vytvořte geometrický model vhodný pro zpracování metodou konečných prvků,
- Vytvořte konečnoprvkový model zábavní atrakce, diskutujte a aplikujte vhodné okrajové podmínky,
- Na základě provedené numerické analýzy vyhodnoťte napětově-deformační stav a zhodnoťte, zda je daná konstrukce pevnostně vyhovující.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] COOK, Robert D. *Finite element modeling for stress analysis*. Vyd. 1. Hong Kong: John Wiley, 1995, 320 s. ISBN 04-711-0774-3.
- [2] *ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release R19.2, help system, ANSYS, Inc.*
- [3] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007.
- [4] ČSN EN 13814. *Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky - Bezpečnost*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2005.
- [5] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.května 2020

Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PIŇOS, M. Napětově – deformační analýza zábavní atrakce: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 110 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá napětově – deformační analýzou zábavní atrakce. V úvodu bakalářské práce je popis konstrukce atrakce a její princip. Dále pak výtah z norem ČSN EN 13814 a ČSN EN 1991-1-4, které jsou důležité pro napětově – deformační analýzu konstrukce zábavní atrakce.

Bakalářská práce řeší kinematiku a silové působení kladkostroje na konstrukci zábavní atrakce. V programu *ANSYS Workbench* 2019R1 je popsána tvorba geometrického modelu a zavedení okrajových podmínek na konstrukci. V bakalářské práci jsou vyhodnoceny čtyři analýzy, jejichž výsledky mají určit, zda konstrukce zábavní atrakce je napětově – deformačně vyhovující.

ABSTRACT OF BACHELOR'S THESIS

PIŇOS, M. Stress-deformation Analysis of Amusement Attraction: Bachelor's thesis. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 110 p. Thesis supervisor: doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

The Bachelor's thesis deals with a stress–deformation analysis of an amusement attraction. The introduction of the Bachelor's thesis describes the structure of the amusement attraction and its principle. It also includes an extract from CSN EN 13814 and CSN EN 1991-1-4 which are important for the stress–deformation analysis of the amusement attraction.

The Bachelor's thesis deals with kinematics and the action of force of the block and tackle on the structure of the amusement attraction. Using *ANSYS Workbench* 2019R1, the creation of the geometric model and establishment of limit conditions for the structure is described. The Bachelor's thesis evaluates four analyses, the results of which shall be used to determine whether the structure of the amusement attraction complies with stress–deformation requirements.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	NORMA ČSN EN 13814.....	14
3	NORMA ČSN EN 1991-1-4	16
3.1	STANOVENÍ ZÁKLADNÍ RYCHLOSTI VĚTRU	17
3.2	STANOVENÍ STŘEDNÍ RYCHLOSTI VĚTRU	17
3.2.1	SOUČINITEL DRSNOSTI	18
3.2.2	SOUČINITEL TERÉNU	18
3.2.3	ORTOGRAFIE	19
3.3	TURBULENCE VĚTRU	19
3.4	MAXIMÁLNÍ DYNAMICKÝ TLAK	20
3.5	SÍLY OD VĚTRU	20
3.6	SOUČINITEL SÍLY PRO KONSTRUKCE A NOSNÉ PRVKY	21
3.6.1	URČENÍ SOUČiniteLE SÍLY PRO PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE BEZ ÚČINKŮ KONCŮ	22
3.6.2	URČENÍ EFEKTIVNÍ ŠTÍHLOSTI λ A SOUČINITEL KONCŮ ψ_λ	22
4	KLADKOSTROJOVÝ MECHANISMUS	24
5	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	37
5.1	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI S355JO	38
6	ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	39
6.1	GEOMETRICKÝ MODEL	40
6.1.1	VYMODELOVANÉ ČÁSTI KONSTRUKCE	42
6.2	VAZBY A KONTAKTY	53
6.2.1	VAZBY A KONTAKTY KORUNY ATRAKCE	53
6.2.2	VAZBY A KONTAKTY VĚŽE ATRAKCE	59
6.2.3	VAZBY A KONTAKTY NÁVĚSU	63
6.3	VYTVOŘENÁ SÍŤ	67
6.4	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	69
6.4.1	PLNÉ ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍM VĚTREM VE SMĚRU OSY Y	69
6.4.2	PLNÉ ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍM VĚTREM VE SMĚRU OSY X	82

6.4.3	NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍ SÍLOU OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y	84
6.4.4	NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍ SÍLOU OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X	90
6.5	VÝSLEDKY PEVNOSTNÍ ANALÝZY	92
6.5.1	ANALÝZA REAKCÍ A SIL	92
6.5.2	ANALÝZA NAPĚTÍ A DEFORMACE	94
7	ZÁVĚR.....	107
8	PODĚKOVÁNÍ	109
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	110

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Velká písmena latinské abecedy

A	[m ²]	...	Plocha průmětových ploch
A _c	[m ²]	...	Obrysová plocha
A _{ref}	[m ²]	...	Referenční plocha
C _{dir}	[-]	...	Součinitel směru větru
C _e (Z)	[-]	...	Součinitel expozice
C _f	[-]	...	Součinitel síly
C _{f,0}	[-]	...	Součinitel síly pro konstrukce bez účinkujících konců
C _o (Z)	[-]	...	Součinitel ortografie
C _r (Z)	[-]	...	Součinitel drsnosti
C _s C _d	[-]	...	Součinitel konstrukce
C _{season}	[-]	...	Součinitel ročního období
E	[MPa]	...	Modul pružnosti v tahu
F _{CK}	[N]	...	Celková tíha od koruny
F _{CK1/4}	[N]	...	Čtvrtinová tíha od koruny
F _{CR_1}	[N]	...	Celková tíha na jedno rameno
F _{CR_10}	[N]	...	Tíha od deseti ramen
F _{GS_1}	[N]	...	Tíha sedačky s bezpečností
F _{od}	[N]	...	Odstředivá síla
F _{Q_1}	[N]	...	Tíha jednoho člověka s bezpečností
F _w	[N]	...	Síla větru působící na konstrukci
G	[N]	...	Tíha působící v laně
G _k	[N]	...	Charakteristická hodnota trvalých zatížení
G _{KA}	[N]	...	Tíha koruny atrakce
G _{1/4}	[N]	...	Čtvrtinová tíha působící v laně

$I_v(Z)$	[-]	...	Turbulence větru
K_k	[-]	...	Bezpečnost konstrukce
L	[m]	...	Délka lana
Q_k	[N]	...	Charakteristická hodnota proměnlivých zatížení
R	[m]	...	Poloměr
R_e	[MPa]	...	Mez kluzu materiálu
V_b	[m/s]	...	Základní rychlost větru
$V_{b,0}$	[m/s]	...	Výchozí základní rychlost větru
V_{index}	[m/s]	...	Rychlost určité kladky
$V_m(Z)$	[m/s]	...	Střední rychlost větru
V_p	[m/s]	...	Rychlost pístu
V_{ref}	[m/s]	...	Referenční rychlost větru

Malá písmena latinské abecedy

g	[m/s ²]	...	Gravitační zrychlení
k_t	[-]	...	Součinitel turbulence
k_r	[-]	...	Součinitel terénu
m	[kg]	...	Hmotnost
n	[ot/min]	...	Otáčky
n_n	[-]	...	Počet neobsazených sedaček
n_o	[-]	...	Počet obsazených sedaček
$q_p(Z)$	[N/m ²]	...	Dynamický tlak
$q_p(Z_e)$	[N/m ²]	...	Maximální dynamický tlak v referenční výšce
r	[m]	...	Vzdálenost tělesa od osy rotace
x_{index}	[m]	...	Vzdálenost pólu od středu kladky
z	[m]	...	Výška atrakce

Z_{\max}	[m]	...	Maximální výška podle normy ČSN EN 1991-1-4
Z_{\min}	[m]	...	Minimální výška uvažována z kategorie terénu
Z_0	[m]	...	Parametr drsnosti terénu
$Z_{0,II}$	[m]	...	Kategorie terénu II z ČSN EN 1991-1-4

Malá písmena řecké abecedy

γ_G	[-]	...	Dílčí součinitel bezpečnosti pro trvalá zatížení
γ_Q	[-]	...	Dílčí součinitel bezpečnosti pro proměnlivá zatížení
ε	[-]	...	Relativní prodloužení
λ	[-]	...	Efektivní štíhlost
π	[-]	...	Pól pohybu
ρ	[kg/m ³]	...	Hustota
ρ_B	[kg/m ³]	...	Hustota s bezpečností
σ	[MPa]	...	Normálové napětí
$\sigma_{\text{red-max}}$	[MPa]	...	Maximální redukované napětí
σ_v	[-]	...	Směrodatná odchylka turbulence
φ	[-]	...	Součinitel plnosti
φ_L	[rad]	...	Úhel natočení mezi osou rotace a lanem
ψ_λ	[-]	...	Součinitel účinků konců
ω	[rad/s]	...	Úhlová rychlost

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá pevnostní analýzou technického zařízení, sloužícího k adrenalinovým zážitkům a k pobavení návštěvníků. Jedná se o výškové technické zařízení, které je většinou provozováno v zábavných parcích, poutích, lunaparcích, ale také při konání oslav Dnů města a podobných kulturních akcí měst a obcí. Tato atrakce je provozována na principu řetízkového kolotoče, jehož koruna se zavěšenými sedačkami vystoupá do výšky cca 20 m, kde se otáčí. Tento typ řetízkového kolotoče lze vidět na Obr. 1.1 a ve složeném stavu na Obr. 1.2.



Obr. 1.1 – Swing Tower [5]

Vzhledem k tomu, že toto technické zařízení je určeno pro lidi, podléhá přísným kritériím, která mají zajistit bezpečnost atrakcí. Bezpečnost pro tyto technická zařízení určuje norma ČSN EN 13814 – Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky – Bezpečnost.



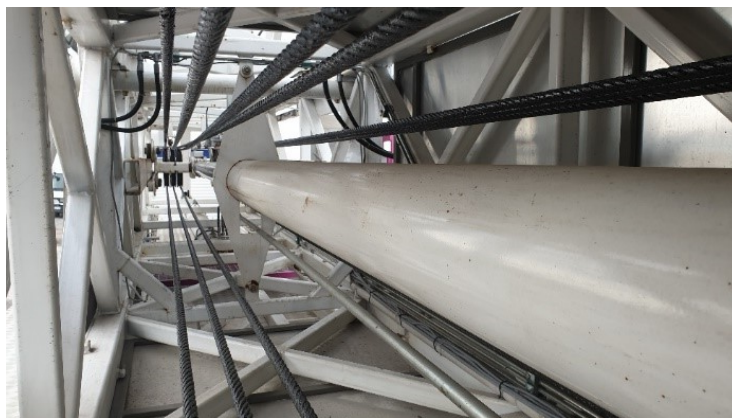
Obr. 1.2 – Zábavní atrakce ve složeném stavu

U technického zařízení proběhla kontrola na maximální, třičtvrtě, poloviční, symetrické a nesymetrické zatížení způsobené od lidí a k tomu se zavedly okrajové podmínky podle normy ČSN EN 1991-1-4 – Obecná zatížení – Zatížení větrem. Napětí vyvolané všemi zavedenými zátěžnými účinky nesmí ve výsledku přesáhnout mez kluzu použitého materiálu.



Obr. 1.3 – Trojúhelníkový kloubový mechanismus

Kontrolovaná zábavní atrakce je složena z příhradových konstrukcí ležících na přívěsu (podvozku) pro nákladní automobil. Celkem se v této konstrukci nachází 7 pístových mechanismů, z toho 6 pístů slouží k postavení věže. Těchto 6 pístů po postavení atrakce již nemá žádný vliv na provoz a funkčnost zařízení. Při stavbě věže se 4 písty pomocí trojúhelníkového kloubového mechanismu (viz. Obr. 1.3) vysunují tak, aby dvě části věže se plynule složily a mohly se poté spojit čepy pro zamezení pohybu. Další 2 písty na podvozku zvedají spodní část věže do horizontální polohy.



Obr. 1.4 – Píst s kladkostrojovým mechanismem

Poslední 7. píst se nachází uvnitř spodní věže, připevněný na podvozku. Tento píst neslouží ke stavbě věže, ale ke zvedání pohyblivé části atrakce při jejím provozu (viz. Obr. 1.4). S pístem je spojený kladkostrojový mechanismus, který pomocí pevných a pohyblivých kladek zvedá do výšky korunu věže.

Samotná koruna se skládá z rotační a nerotační (pohyblivé) části, kde její nerotační část je umístěna na válečcích, které jezdí po konstrukci věže. Na nerotující části koruny jsou umístěny dva asynchronní motory, které pomocí ozubení roztáčí rotační část koruny, na které jsou umístěny ramena se zavěšenými sedačkami.

Celá konstrukce je umístěna na návěsu, který je součástí atrakce. Návěs je vyroben kombinací I a U profilů a má 4 výklopné nohy, které slouží ke stabilizaci atrakce (viz. Obr. 1.5).



Obr. 1.5 – Výklopné nohy návěsu

Na konstrukci byla provedena statická analýza, a to na částech tvořících samotnou příhradovou konstrukci. Ostatní části konstrukce nebudou zahrnuty do analýzy (např. kladkostroj, písty, sedačky, závěsy, ložiska, čepy, šrouby atd.). Tyto části nejsou předmětem analýzy a budou zavedené formou okrajových podmínek do výpočtového modelu.

2 NORMA ČSN EN 13814

Norma ČSN EN 13814 - Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky – Bezpečnost. Norma udává popis, jaké podklady a dokumenty jsou potřebné pro posouzení stability a provozní bezpečnosti prostředků lidové zábavy. K tomu je požadován popis konstrukce, provozu a provozní bezpečnosti, kompletní analýza namáhání, únavy materiálu a stability.

Zásady analýzy (kap. 5.1.4 ČSN EN 13814)

- analýza mezních stavů únosnosti,
- analýza mezních stavů únavy,
- analýza mezních stavů stability, tj. ohnutí tyčí, vyboulení desek a pláště,
- případně ověření mezních stavů deformace,
- ověření bezpečnosti proti převrácení, sklouznutí a zdvihnutí z podkladu,
- dynamická analýza.

V této práci byly počítány silové účinky vyvolané kombinací sil na konstrukci a byla využita analýza únosnosti a mezních stavů deformace. Podstatou navrhovaného projektu je zjištění maximálního redukovaného napětí a jeho porovnání s mezí kluzu použitého materiálu.

Dále norma stanovuje výběr materiálu (kap. 5.2 ČSN EN 13814). Jedná se o materiály, které jsou obsaženy v evropských normách pro stavby. Jelikož je zábavní atrakce konstrukční součástí, byla vybrána ocel S355JO (podle EN 10025).

Konstrukční zatížení je popsáno v kap. 5.3 ČSN EN 13814. U této atrakce bylo postupováno dle kap. 5.3.3 ČSN EN 13814 - proměnlivé vertikální provozní zatížení.

Ve výpočtu nebyly brány v úvahu děti, i když by na atrakci mohly být. Tímto způsobem stojím na straně bezpečnosti. Provozní zatížení pro každou osobu starší 10-ti let a pro jednotky se dvěma a více pasažéry norma uvažuje dle vztahu 2.1.

$$Q_k = 0,75 \text{ kN} \quad . \quad (2.1)$$

V kap. 5.3.6 ČSN EN 13814 norma popisuje kombinaci zatížení a definuje výpočtové (konstrukční) hodnoty zatížení následujícím způsobem dle vztahu 2.3.

$$\sum \gamma_G G_k (= 1,35 G_k) \quad , \quad (2.2)$$

$$\sum \gamma_G G_k + \sum \gamma_Q Q_k (= \sum 1,35 G_k + \sum 1,35 Q_k) \quad , \quad (2.3)$$

kde:

γ_G ... dílčí součinitel bezpečnosti pro trvalá zatížení (= 1,1 nebo 1,35),

γ_Q ... dílčí součinitel bezpečnosti pro proměnlivá zatížení (= 1,35),

G_k ... charakteristická hodnota trvalých zatížení,

Q_k ... charakteristická hodnota proměnlivých zatížení.

Pro trvalé i proměnlivé zatížení např. od konstrukce nebo od lidí, byl vynásoben součinitelem bezpečnosti 1,35.

V kap. 5.4.2 ČSN EN 13814 jsou stanoveny podmínky pro zásady statických výpočtů prostředků lidové zábavy.

Rotující prostředky lidové zábavy musí být počítány v klidu i za provozního stavu, v plném i částečném zatížení a při nevyvážených podmínkách. V případě mé práce, jsem konstrukci počítal jen za provozního stavu. Zaváděl jsem plné a jednostranné zatížení, které je definováno jako obsazení sedadel umístěné na ¼ obvodu. Odpovídající místa zatížení byla vybrána pro nejméně příznivý případ, tzn. že pokud síla od větru působí v jednom směru, tak jednostranné zatížení od lidí musí být ve stejném směru.

Zatížení větrem je uvedeno v kap. 5.3.3.4 ČSN EN 13814. Norma popisuje, že zařízení musí být chráněno nebo vhodným způsobem zesíleno, dosáhne-li skutečná rychlost větru $V_{ref} \geq 25$ m/s ve výšce 10-ti metrů. Dále norma uvádí, že pokud je rychlost větru $V_{ref} \geq 15$ m/s, musí být provozované zařízení zastaveno. Veškerá zatížení větrem je odvozeno z ČSN EN 1991-1-4 - Obecná zatížení - Zatížení větrem.

3 NORMA ČSN EN 1991-1-4

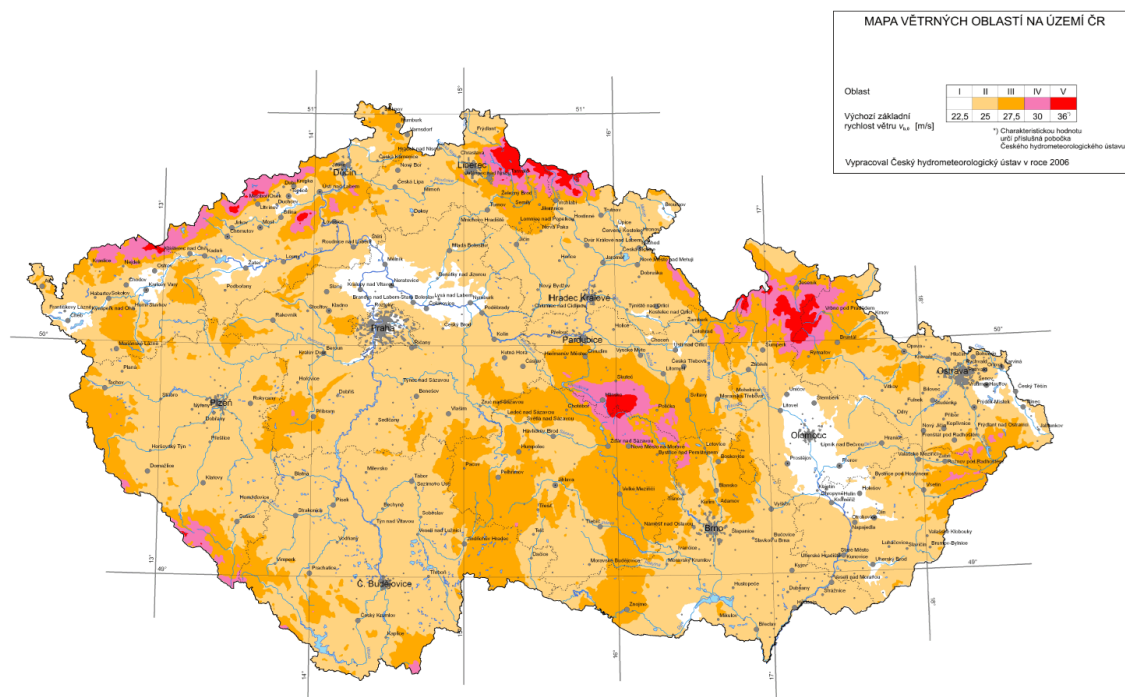
Norma uvádí pokyny pro stanovení zatížení větrem, pro navrhování pozemních a inženýrských staveb, pro každou z uvažovaných ploch. Norma zahrnuje celé konstrukce, části konstrukcí nebo prvky na nich připevněné, tj. dílce, prvky obvodového pláště a zařízení pro jejich upevnění, svodidla a protihlukové stěny.

Tato norma platí pro inženýrské stavby s výškou do 200 m, neplatí ale pro následující případy:

- zatížení větrem na příhradové věže s nerovnoběžnými stěnami,
- zatížení kotevních stožárů a komínů větrem,
- kmitání, při kterém se musí uvažovat více tvarů kmitání,
- zavěšené mosty,
- kmitání hlavní nosné konstrukce mostu od turbulence větru v příčném směru,
- kroutivé kmitání, např. vysokých budov s centrálním jádrem.

Zatížení větrem jsou proměnná v čase a působící přímo jako tlaky na vnější povrchy uzavřených konstrukcí. Tlaky působící na plochy povrchu způsobují síly kolmé k povrchu konstrukce nebo k jednotlivým prvkům pláště. Účinek větru na konstrukci závisí na velikosti, tvaru a dynamických vlastnostech konstrukce.

Pro zjištění síly a dynamického tlaku od větru působící na konstrukci, je potřeba zjistit střední flukтуаční složky, které jsou uvedené v kap. 4 normy ČSN EN 1991-1-4. Prvním krokem je zjištění střední rychlosti větru, od výchozí základní rychlosti větru $v_{b,0}$, která je uvedena v mapě větrných oblastí na území ČR (viz. Obr. 3.1).



Obr. 3.1 – Mapa větrných oblastí na území ČR [2]

Z Obr. 3.1 se zvolí pro náš případ vyhovující oblast s přiřazenou hodnotou $v_{b,0}$, základní rychlost větru se odvodí dle vztahu 3.1.1.

3.1 STANOVENÍ ZÁKLADNÍ RYCHLOSTI VĚTRU

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad , \quad (3.1.1)$$

kde:

$V_b \dots$ základní rychlost větru ve výšce 10-ti m nad zemí v terénu kategorie II, definovaná jako funkce směru větru a ročního období,

$V_{b,0} \dots$ výchozí základní rychlost větru,

$C_{dir} \dots$ součinitel směru větru,

$C_{season} \dots$ součinitel ročního období.

Pro konstantu směru větru C_{dir} stanovuje norma doporučenou hodnotu 1 (Poznámka 2), rovněž pro konstantu ročního období C_{season} se doporučuje hodnota 1 (Poznámka 3) v kap. 4 normy ČSN EN 1991-1-4.

3.2 STANOVENÍ STŘEDNÍ RYCHLOSTI VĚTRU

Střední rychlost větru $V_m(Z)$ se mění v závislosti na výšce nad terénem a závisí na drsnosti terénu, ortografii a základní rychlosti větru V_b . Vypočte se dle vztahu 3.2.1.

$$V_m(Z) = C_r(Z) \cdot C_o(Z) \cdot V_b \quad , \quad (3.2.1)$$

kde:

$C_r(Z) \dots$ součinitel drsnosti viz. kap. 3.2.1,

$C_o(Z) \dots$ součinitel ortografie (= 1), viz. kap. 3.2.3.

3.2.1 SOUČINITEL DRSNOSTI

Součinitel drsnosti $C_r(Z)$ vyjadřuje změnu střední rychlosti větru v místě konstrukce způsobenou:

- výškou nad úrovní terénu,
- drsnosti povrchu terénu na návětrné straně konstrukce pro uvažovaný směr větru.

Součinitel drsnosti $C_r(Z)$ se odvodí dle vztahu 3.2.1.1.

$$C_r(Z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ pro } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad , \quad (3.2.1.1)$$

kde:

$z_0 \dots$ parametr drsnosti terénu,

$k_r \dots$ součinitel terénu, který závisí na uvažovaném parametru drsnosti terénu z_0 a vypočte se podle vztahu 3.2.2.1.

3.2.2 SOUČINITEL TERÉNU

Součinitel terénu se odvodí dle vztahu 3.2.2.1.

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad , \quad (3.2.2.1)$$

kde:

$z_{0,II} \dots$ = 0,05 (kategorie terénu II Tab. 3.1),

$z_{\min} \dots$ je minimální výška definovaná v Tab. 3.1,

$z_{\max} \dots$ se uvažuje 200 m.

Parametr z_0 a výšky z_{\min} závisí na kategorii terénu. Doporučené hodnoty jsou uvedené v Tab. 3.1. Výraz 3.2.1.1 je platný, pokud je drsnost terénu na návětrné straně neměnná na dostatečně dlouhé vzdálenosti.

Tab. 3.1 – Kategorie terénu a jejich parametry [2]

Kategorie terénu	z_0 [m]	z_{\min} [m]
0 – Moře nebo pobřežní oblast vystavené otevřenému moři	0,003	1
I – Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II – Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek	0,05	2
III – Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV – Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10

3.2.3 ORTOGRAFIE

Kde ortografie (tj. kopce, útesy apod.) zvyšuje rychlost větru o víc než 5 %. Doporučený součinitel ortografie je 1.

3.3 TURBULENCE VĚTRU

Intenzita turbulence $I_v(Z)$ ve výšce z je definovaná jako podíl směrodatné odchylky turbulence a střední rychlosti větru. Turbulentní složka rychlostí větru má střední hodnotu 0 a směrodatnou odchylku σ_v .

Stanovení směrodatné odchylky turbulence je dle vzorce 3.3.1.

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad . \quad (3.3.1)$$

Výsledné stanovení intenzity turbulence je dle vzorce 3.3.2.

$$I_v(Z) = \frac{\sigma_v}{V_m(Z)} = \frac{k_I}{C_0(Z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{pro } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad , \quad (3.3.2)$$

kde:

k_I ... je součinitel turbulence, doporučená hodnota je 1,

$C_0(Z)$... součinitel ortografie, viz. kap. 3.2.3,

z_0 ... parametr drsnosti terénu, uvedený v Tab. 3.1.

3.4 MAXIMÁLNÍ DYNAMICKÝ TLAK

Maximální dynamický tlak $q_p(Z)$ je stanoven ve výšce z , který zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace rychlosti větru a odvodí se podle vztahu 3.4.1.

$$q_p(Z) = [1 + 7 \cdot I_v(Z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(Z) = C_e(Z) \cdot q_b \quad , \quad (3.4.1)$$

kde:

$\rho \dots$ je měrná hmotnost vzduchu, která závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku, který je v oblasti očekáván při silné vichřici. Doporučená hodnota je $1,25 \text{ kg/m}^3$,

$C_e(Z) \dots$ součinitel expozice,

$q_b \dots$ základní dynamický tlak větru.

3.5 SÍLY OD VĚTRU

Síly od větru na celou konstrukci nebo nosný prvek se stanoví výpočtem sil, za použití součinitelů sil. Síla F_w působící na konstrukci nebo nosný prvek se stanoví, jako vektorový součet sil, na jednotlivé nosné prvky dle vztahu 3.5.1.

$$F_w = C_s C_d \times C_f \times q_p(Z_e) \times A_{ref} \quad . \quad (3.5.1)$$

V kap. 5.3.3.4 normy ČSN EN 13814 - Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky – Bezpečnost, je stanoven vzorec pro výpočet zatížení větrem 3.5.2.

$$F_w = q_{ep} \times C_f \times A_{ref} \quad . \quad (3.5.2)$$

Z toho vyplývá, že norma ČSN EN 13 814 bere součinitel $C_s C_d$ jako 1. Zvolením tohoto součinitele $C_s C_d = 1$ se při výpočtu stojí na straně bezpečnosti konstrukce, jelikož součinitel $C_s C_d$ nikdy nebude vyšší jak 1.

Tudíž z toho vyplývá, že finální tvar pro výpočet síly od větru se stanoví jako 3.5.3.

$$F_w = \sum_{prvky} C_f \cdot q_p(Z_e) \cdot A_{ref} \quad . \quad (3.5.3)$$

Sílu působící na jednu část konstrukce nebo nosný prvek, lze ve výsledku vypočítat podle 3.5.4,

$$F_w = C_f \cdot q_p(Z_e) \cdot A_{ref} \quad , \quad (3.5.4)$$

kde:

$C_s C_d \dots$ je součinitel konstrukce,

$C_f \dots$ součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky,

$q_p(Z_e) \dots$ je maximální dynamický tlak v referenční výšce z_e ,

$A_{ref} \dots$ referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku.

3.6 SOUČINITEL SÍLY PRO KONSTRUKCE A NOSNÉ PRVKY

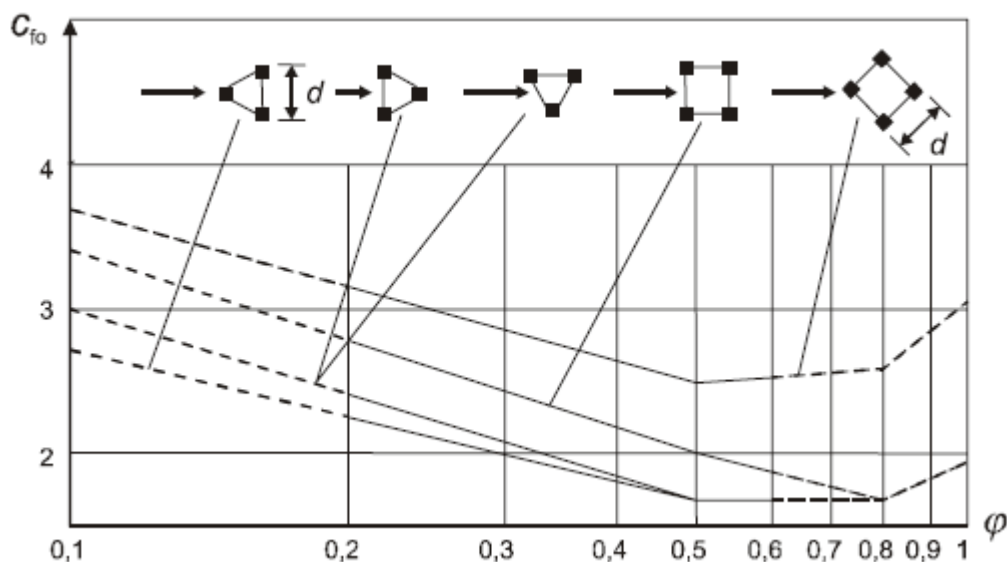
Součinitel síly C_f pro příhradové konstrukce a nosné prvky se spočítá ze vztahu 3.6.1. Grafické znázornění součinitele $C_{f,0}$ pro příhradové konstrukce lze vidět na Obr. 3.2.

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad , \quad (3.6.1)$$

kde:

$C_{f,0} \dots$ součinitel síly pro příhradové konstrukce nebo nosné prvky bez účinkujících konců,

$\psi_\lambda \dots$ součinitel účinků konců, jako funkce štíhlosti konstrukce λ , vypočítané pro délku l a šířku b .



Obr. 3.2 – Součinitel síly $C_{f,0}$ pro příhradové konstrukce s úhelníkovými prvky jako funkce plnosti ϕ [2]

3.6.1 URČENÍ SOUČinitele SÍLY PRO PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE BEZ ÚČINKŮ KONCŮ

Z grafu je odečtena hodnota součinitele síly C_{f0} v závislosti na poměrné plnosti φ a na úhelníkovém profilu příhradové konstrukce.

Součinitel plnosti φ popisuje poměr z kolika procent je zaplněný prostor na plášti příhradové konstrukce. Vztah je dán 3.6.1.1.

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad , \quad (3.6.1.1)$$

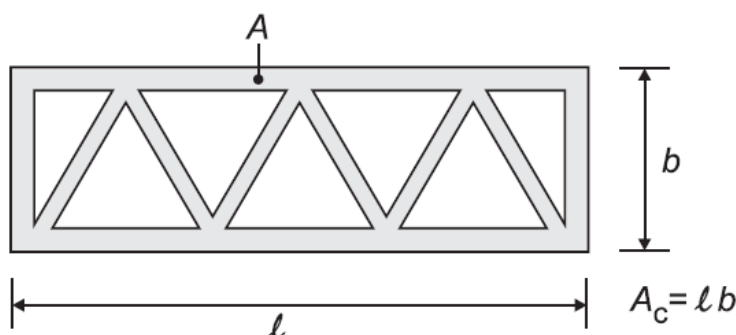
kde:

$A \dots$ je součet ploch daných prvků,

$A_c \dots$ celková obrysová plocha.

Celková obrysová plocha viz. Obr. 3.3 znázorněná definice, je vypočítána podle vztahu 3.6.1.2.

$$A_c = l \cdot b \quad . \quad (3.6.1.2)$$



Obr. 3.3 – Definice poměrné plnosti φ [2]

3.6.2 URČENÍ EFEKTIVNÍ ŠTÍHLosti λ A SOUČiniteL KONCŮ ψ_λ

Definice efektivní štíhlosti λ je závislost od rozměrů konstrukce, k její poloze. Pro příhradové konstrukce v mezi intervalu se λ určí, jako lineární interpolace pro mezihodnoty l v Tab.3.2

Tab. 3.2 – Doporučené hodnoty λ pro příhradové konstrukce [2]

pro $l \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 1,4 \frac{l}{b}$ nebo $\lambda=70$, které je menší	
pro $l \leq 50 \text{ m}$, $\lambda = 2 \frac{l}{b}$ nebo $\lambda=70$, které je menší	

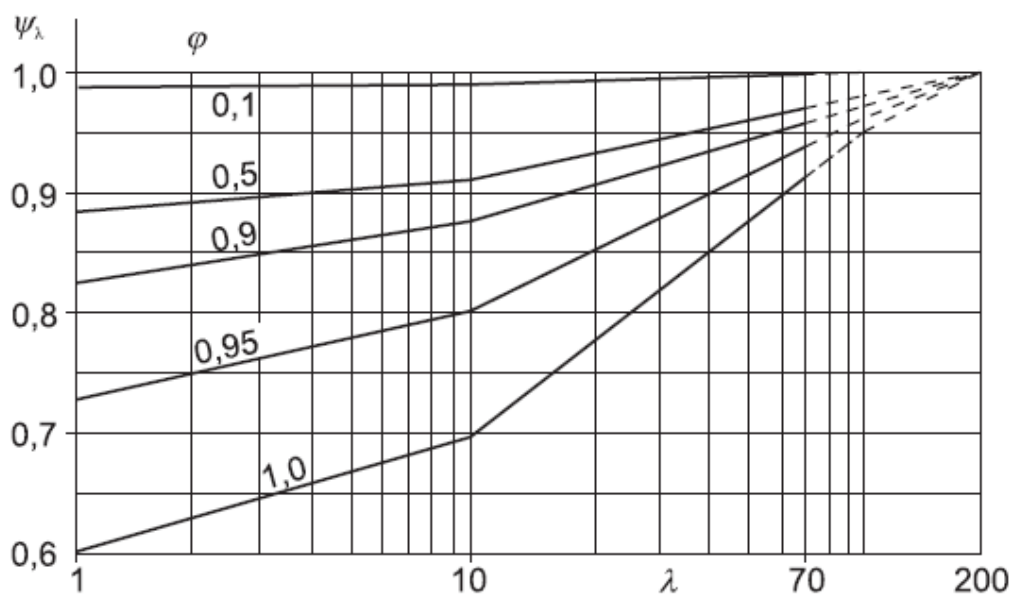
kde:

l ... je délka konstrukce,

b ... je šířka konstrukce.

Součinitele síly $C_{f,0}$ jsou založeny na měřeních na konstrukcích bez proudění kolem volných nadzemních konců. Součinitel účinků konců zohledňuje redukovanou odolnost konstrukce v důsledku proudění větru okolo volného konce.

Součinitel konců se odvodí z Obr. 3.4.



Obr. 3.4 – Orientační hodnoty součinitele účinku konců ψ_λ jako funkce poměrné plnosti φ a štíhlosti λ [2]

Norma ČSN EN 1991-1-4 v kap. 7.11 stanovuje určení referenční plochy A_{ref} . Ta je rovna součtu obsahu plošných prvků na konstrukci. Dále stanovuje, že referenční výška Z_e je rovna maximální výšce prvku nad terénem.

4 KLADKOSTROJOVÝ MECHANISMUS

Kladkostroje všeobecně slouží ke snižování síly působící v laně. Kladkostroj může obsahovat různý počet kladek, ale vždy musí být alespoň jedna kladka pevná a jedna kladka volná. U kladkostrojů působí snížená síla, ale v opačném poměru se prodlouží dráha lana, jelikož platí zákon o zachování energie.

Pevná kladka je kladka, která je pevně připevněná ke kotvicímu bodu, např. konstrukci. Při pohybu lana se kladka neposunuje, ale pouze otáčí a mění směr pohybu lana. Volná kladka je připevněná k pohyblivé větvi lana. Při pohybu mění směr lana a na dvakrát delší dráze sníží sílu v laně na polovinu.

Popisované technické zařízení využívá obecný kladkostrojový mechanismus.

Výhody a nevýhody uvedeného kladkostroje:

Výhody

- prodloužení dráhy lana, větší rychlost zvedané koruny atrakce

Nevýhody

- zvýšená působící síla, hlavně na píst a čepy



Obr. 4.1 – Pevná kladka na špičce věže

Celý kladkostroj obsahuje 14 kladek. Kladky jsou rozděleny na 6 volných a 8 pevných kladek. Dvě pevné kladky jsou umístěny na špičce věže (viz. Obr. 4.1), přes tyto kladky je zvedána či spouštěna koruna atrakce. Hlavním srdcem celého kladkostroje je 6 volných kladek (viz. Obr. 4.2) a 6 pevných kladek (viz. Obr. 4.3), které jsou umístěné uvnitř spodní věže.



Obr. 4.2 – Vozík s volnými kladkami

Lze pozorovat, že celý mechanismus je složen ze dvou stejných kladkostrojů, kde jeden kladkostroj obsahuje 3 volné kladky, 3 pevné kladky a 1 pevnou kladku na věži. Tíha koruny je rozložena do vedení dvou lan, kde každé lano je zvlášť navinuto přes 3 volné a 4 pevné kladky a upevněno ke konstrukci podvozku (viz. Obr. 4.4).

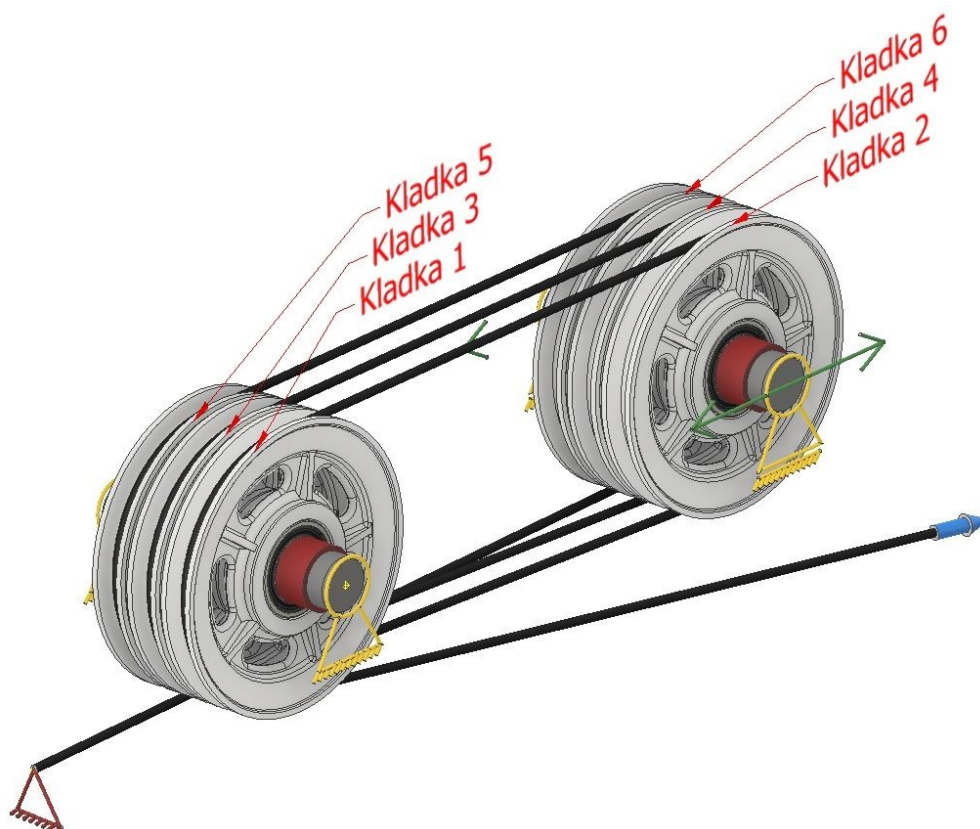


Obr. 4.3 – Pevné kladky připevněné ke konstrukci

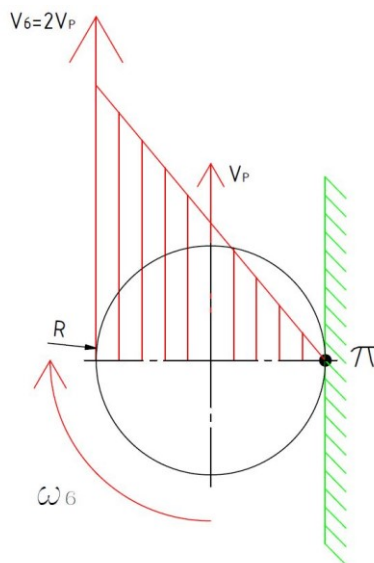


Obr. 4.4 – Upevnění lana ke konstrukci podvozku vedle pevných kladek

Ke kinematickému rozboru celého kladkostroje bude stačit již zmíněná polovina celého mechanismu (celý systém je zdvojený). Na Obr. 4.5 je informativně znázorněný systém kladkostroje bez pístu, šroubů a dalších strojních součástí, které nejsou nutné k vysvětlení kinematického principu.



Obr. 4.5 – Zjednodušený model kladkostroje

Kladka 6 (první volná kladka)**Obr. 4.7 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 6**

Výpočet úhlové rychlosti ω_6 :

$$\omega_6 = \frac{V_P}{R} \quad , \quad (4.1)$$

výpočet rychlosti V_6 :

$$V_6 = 2 \cdot V_P \quad , \quad (4.2)$$

kde:

ω_6 ... je úhlová rychlost pro kladku 6,

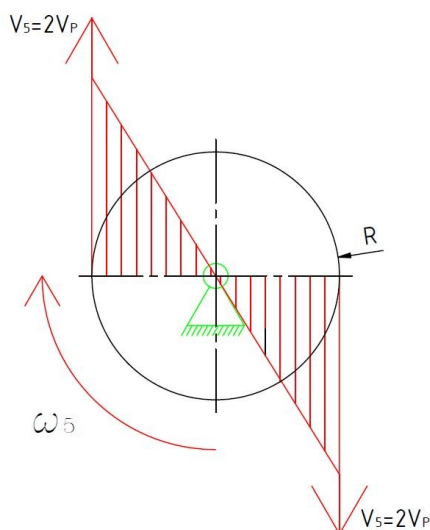
V_6 ... je rychlost pro kladku 6,

V_P ... je rychlost vysouvání pístu,

R ... poloměr kladky,

π ... pól pohybu.

U kladky 6 je vidět, že v pólu pohybu má lano nulovou rychlost. Lano na protilehlé straně od středu kladky proti pólu (kde se lano odpoutává od povrchu kladky) má dvojnásobnou rychlost vysouvajícího pístu.

Kladka 5 (první pevná kladka)**Obr. 4.8 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 5**

Výpočet úhlové rychlosti ω_5 :

$$\omega_5 = \frac{2 \cdot V_P}{R} \quad , \quad (4.3)$$

výpočet rychlosti V_5 :

$$V_5 = V_6 = 2 \cdot V_P \quad , \quad (4.4)$$

kde:

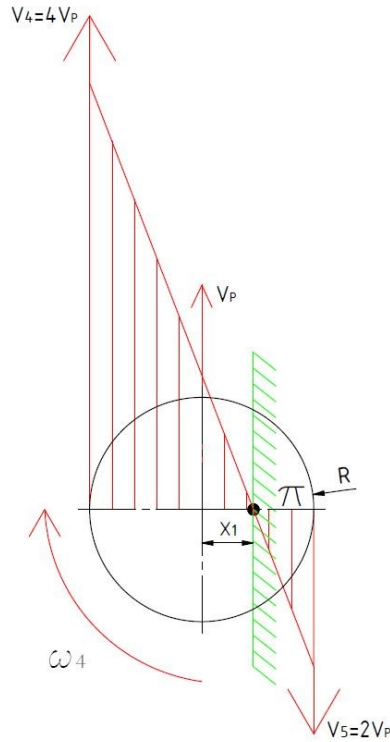
ω_5 ... je úhlová rychlost pro kladku 5,

V_5 ... je rychlost pro kladku 5,

V_P ... je rychlost vysouvání pístu,

R ... poloměr kladky.

U pevné kladky 5 (Obr. 4.8) se nemění rychlost vycházející od volné kladky 6. Rychlost V_5 je rovna dvojnásobku rychlosti V_P . Rychlosti lan na obou protilehlých koncích od středu kladky (kde lano se odpoutává od povrchu) se rovnají.

Kladka 4 (druhá volná kladka)

Obr. 4.9 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 4

Výpočet pozice posunutého pólu π z rovnosti úhlových rychlostí:

$$\omega_4 = \omega_4 \rightarrow \frac{V_p}{x_1} = \frac{2 \cdot V_p}{R - x_1} \quad , \quad (4.5)$$

$$\frac{R - x_1}{x_1} = 2 \quad ,$$

$$\frac{R}{x_1} - 1 = 2 \quad ,$$

$$\frac{R}{x_1} = 3 \rightarrow x_1 = \frac{R}{3} \quad ,$$

výpočet úhlové rychlosti V_4 z rovnosti úhlových rychlostí:

$$\omega_4 = \omega_4 \rightarrow \frac{V_4}{R + x_1} = \frac{V_p}{x_1} \quad , \quad (4.6)$$

$$V_4 = V_p \cdot \frac{R + x_1}{x_1} = V_p \cdot \frac{\frac{R}{1} + \frac{R}{3}}{\frac{R}{3}} = V_p \cdot \frac{\frac{4 \cdot R}{3}}{\frac{R}{3}} = V_p \cdot \frac{12 \cdot R}{3 \cdot R} = 4 \cdot V_p \quad ,$$

výpočet úhlové rychlosti ω_4 :

$$\omega_4 = \frac{V_4}{R + x_1} = \frac{4 \cdot V_P}{R + x_1} = \frac{\frac{4 \cdot V_P}{1}}{R + \frac{R}{3}} = \frac{\frac{4 \cdot V_P}{1}}{\frac{4 \cdot R}{3}} = \frac{12 \cdot V_P}{4 \cdot R} = \frac{3 \cdot V_P}{R} , \quad (4.7)$$

kde:

ω_4 ... je úhlová rychlost pro kladku 4,

V_4 ... je rychlost pro kladku 4,

V_P ... je rychlost vysouvání pístu,

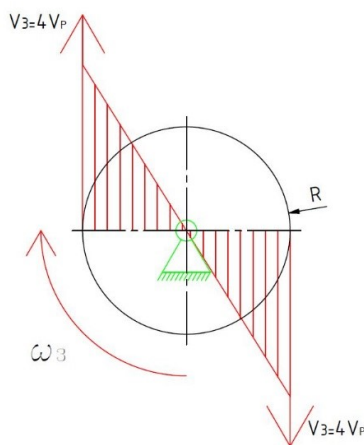
R ... poloměr kladky,

π ... pól pohybu,

x_1 ... vzdálenost pólu od středu kladky.

U kladky 4 (Obr. 4.9) panují složitější kinematické poměry. Střed kladky se pohybuje rychlostí pístu V_P vzhůru a pravý kraj nabíhající části lana se pohybuje rychlostí $V_5 (=2V_P)$ dolů. Z toho vyplývá, že pól pohybu leží v jedné třetině poloměru kladky a rychlost odbíhající části lana je $V_4 (=4V_P)$.

Kladka 3 (druhá pevná kladka)



Obr. 4.10 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 3

Výpočet úhlové rychlosti ω_3 :

$$\omega_3 = \frac{4 \cdot V_P}{R} , \quad (4.8)$$

výpočet rychlosti V_3 :

$$V_3 = V_4 = 4 \cdot V_p \quad , \quad (4.9)$$

kde:

ω_3 ... je úhlová rychlost pro kladku 3,

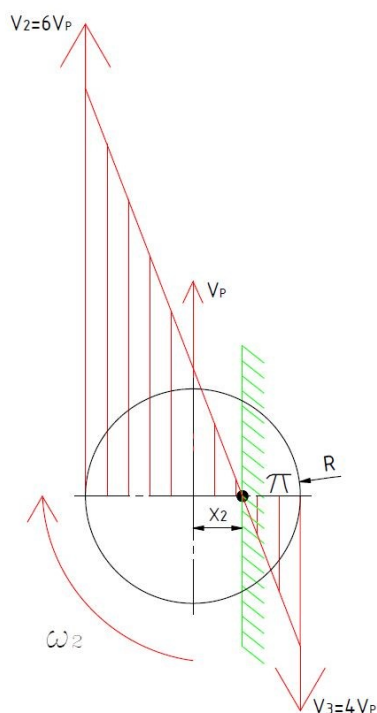
V_3 ... je rychlost pro kladku 3,

V_p ... je rychlost vysouvání pístu,

R ... poloměr kladky.

Kladka 3 (Obr. 4.10) má stejný princip jako kladka 5, jen má rozdílné vstupní a výstupní rychlosti.

Kladka 2 (třetí volná kladka)



Obr. 4.11 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 2

Výpočet pozice posunutého pólu π z rovnosti úhlových rychlostí:

$$\omega_2 = \omega_2 \rightarrow \frac{V_p}{x_2} = \frac{4 \cdot V_p}{R - x_2} \quad , \quad (4.10)$$

$$\frac{R - x_2}{x_2} = 4 \quad ,$$

$$\frac{R}{x_2} = 5 \rightarrow x_2 = \frac{R}{5} ,$$

výpočet úhlové rychlosti V_2 z rovnosti úhlových rychlostí:

$$\omega_2 = \omega_2 \rightarrow \frac{V_2}{R + x_2} = \frac{V_p}{x_2} , \quad (4.11)$$

$$V_2 = V_p \cdot \frac{R + x_2}{x_2} = V_p \cdot \frac{\frac{R}{1} + \frac{R}{5}}{\frac{R}{5}} = V_p \cdot \frac{\frac{6 \cdot R}{5}}{\frac{R}{5}} = V_p \cdot \frac{30 \cdot R}{5 \cdot R} = 6 \cdot V_p ,$$

výpočet úhlové rychlosti ω_2 :

$$\omega_2 = \frac{V_2}{R + x_2} = \frac{6 \cdot V_p}{R + x_2} = \frac{\frac{6 \cdot V_p}{1}}{R + \frac{R}{5}} = \frac{\frac{6 \cdot V_p}{1}}{\frac{6 \cdot R}{5}} = \frac{30 \cdot V_p}{6 \cdot R} = \frac{5 \cdot V_p}{R} , \quad (4.12)$$

kde:

ω_2 ... je úhlová rychlost pro kladku 2,

V_2 ... je rychlost pro kladku 2,

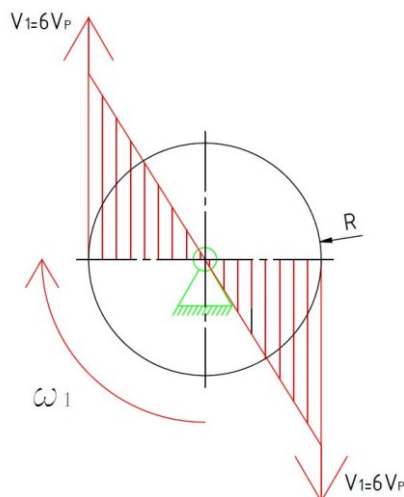
V_p ... je rychlost vysouvání pístu,

R ... poloměr kladky,

π ... pól pohybu,

x_2 ... vzdálenost pólu od středu kladky.

Kladka 2 (Obr. 4.11) má podobné kinematické vlastnosti jako kladka 4, jen je rozdíl v pozici pólu pohybu, který leží v jedné pětinaš poloměru kladky od středu a rychlost odbíhající části lana je $V_2 (=6V_p)$. Výsledný převod je 1:6.

Kladka 1 (tření pevná kladka)**Obr. 4.12 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 1**

Výpočet úhlové rychlosti ω_1 :

$$\omega_1 = \frac{6 \cdot V_P}{R} \quad , \quad (4.13)$$

výpočet rychlosti V_1 :

$$V_1 = V_2 = 6 \cdot V_P \quad , \quad (4.14)$$

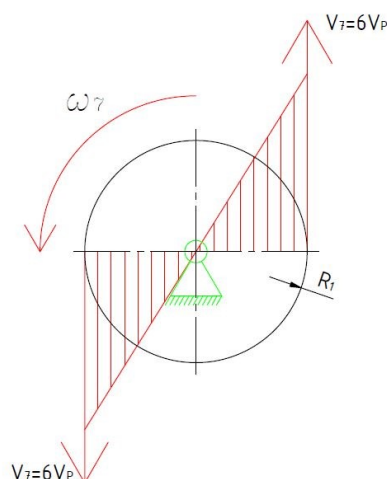
kde:

ω_1 ... je úhlová rychlost pro kladku 1,

V_1 ... je rychlost pro kladku 1,

R ... poloměr kladky.

Kladka 1 (Obr. 4.12) má stejný princip jako kladka 3, jen má rozdílné vstupní a výstupní rychlosti.

Kladka 7 (pevná kladka umístěná na věži)**Obr. 4.13 – Grafický rozbor rychlostí u kladky 7**

Výpočet úhlové rychlosti ω_7 :

$$\omega_7 = \frac{6 \cdot V_p}{R_1} , \quad (4.15)$$

výpočet rychlosti V_7 :

$$V_7 = V_1 = V_2 = 6 \cdot V_p , \quad (4.16)$$

kde:

ω_7 ... je úhlová rychlost pro kladku 7,

V_7 ... je rychlost pro kladku 7,

R_1 ... poloměr kladky.

Sedmá pevná kladka (Obr. 4.13) je umístěná na věži a má rychlosti lan na obou protilehlých koncích od středu kladky rovny ($V_7=6V_p$).

Pro přehledné znázornění kinematických rychlostí a sil v kladkostroji byl vytvořen 2D model podle Obr. 4.5, který ukazuje výsledné směry a velikosti pohybu lan (viz. Obr. 4.6).

Na atrakci je využíván obecný kladkostrojový mechanismus, který má zvednout korunu atrakce do výšky 20-ti metrů. Díky převodovému poměru 1:6 mezi volnými a pevnými kladkami se docílí výsledku, že při posunu pístu s volnými kladkami o 1 metr se zvedne koruna atrakce o 6 metrů. Z uvedeného poměru 1:6 je zřejmé, že rychlost stoupající koruny atrakce je 6-krát vyšší než rychlost zvedacího pístu.

Z Obr. 4.6 vyplývá, že zatížení na hřídel třech paralelních kladek je 6-krát tíha v laně G , kde G je polovina tíhy vč. všech dalších (nemodelovaných) dílů s korunou spojených, vč. osob sedících na atrakci (mechanismus je zdvojený pro dvě lana).

Zatížení od kladek 7 se do konstrukce projeví jako 2-krát zatížení G .

Zatížení na píst zdvíhající volné kladky (viz. Obr. 1.4) je 2-krát zatížení jedné hřídele na volných kladkách, tzn. že celková síla působící na píst je 12-krát tíha G .

5 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

U konstrukce zábavní atrakce je navržen lineární materiálový model, a to z důvodu, že při provozním stavu atrakce není uvažován destrukční stav. Konstrukce atrakce je vyrobená z materiálu S355JO (ČSN 11523), jedná se o konstrukční nelegovanou ocel.

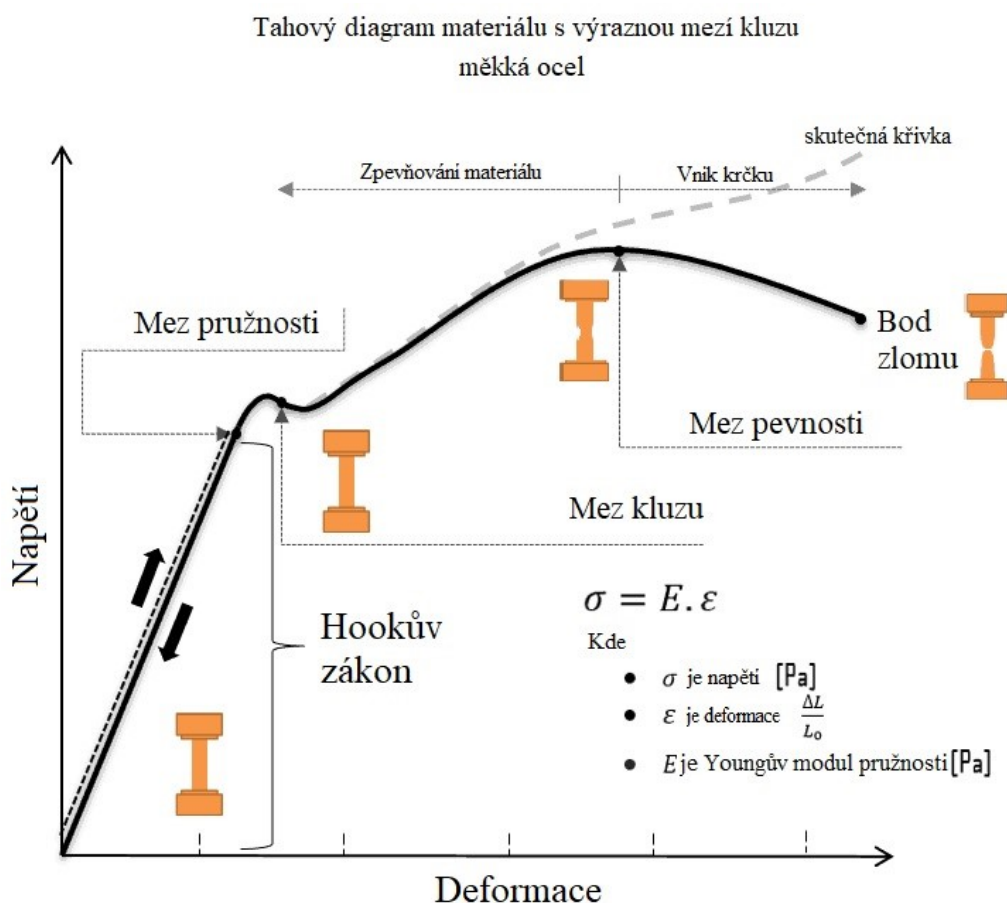
Používá se lineární materiálový model, který je specifický tím, že využívá přímou úměru mezi napětím a deformací materiálu. Přímá úměra je vyjádřena Hookovým zákonem (viz. Obr. 5.1)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad , \quad (5.1)$$

kde:

E ... je modul pružnosti v tahu,

ε ... je poměrná deformace.



Obr. 5.1 – Tahový diagram měkké oceli [7]

Všechny pevnostní podmínky musí splnit kritérium, že redukované napětí nesmí být větší jak mez kluzu použitého materiálu. Pokud by redukované napětí bylo vyšší jak mez kluzu, došlo by k trvalým deformacím či porušení a konstrukce by nevyhovovala.

5.1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI S355JO

Celá konstrukce je vyrobena z materiálu S355JO podle normy ČSN EN 13814, její materiálové vlastnosti jsou popsány v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Vlastnosti ocele S355JO [6]

Modul pružnosti v tahu (Youngův modul pružnosti)	$2,1 \cdot 10^5$ MPa
Poissonovo číslo	0,3
Mez kluzu	355 MPa
Mez pevnosti v tahu	470 – 630 MPa
Hustota	7800 kg/m ³

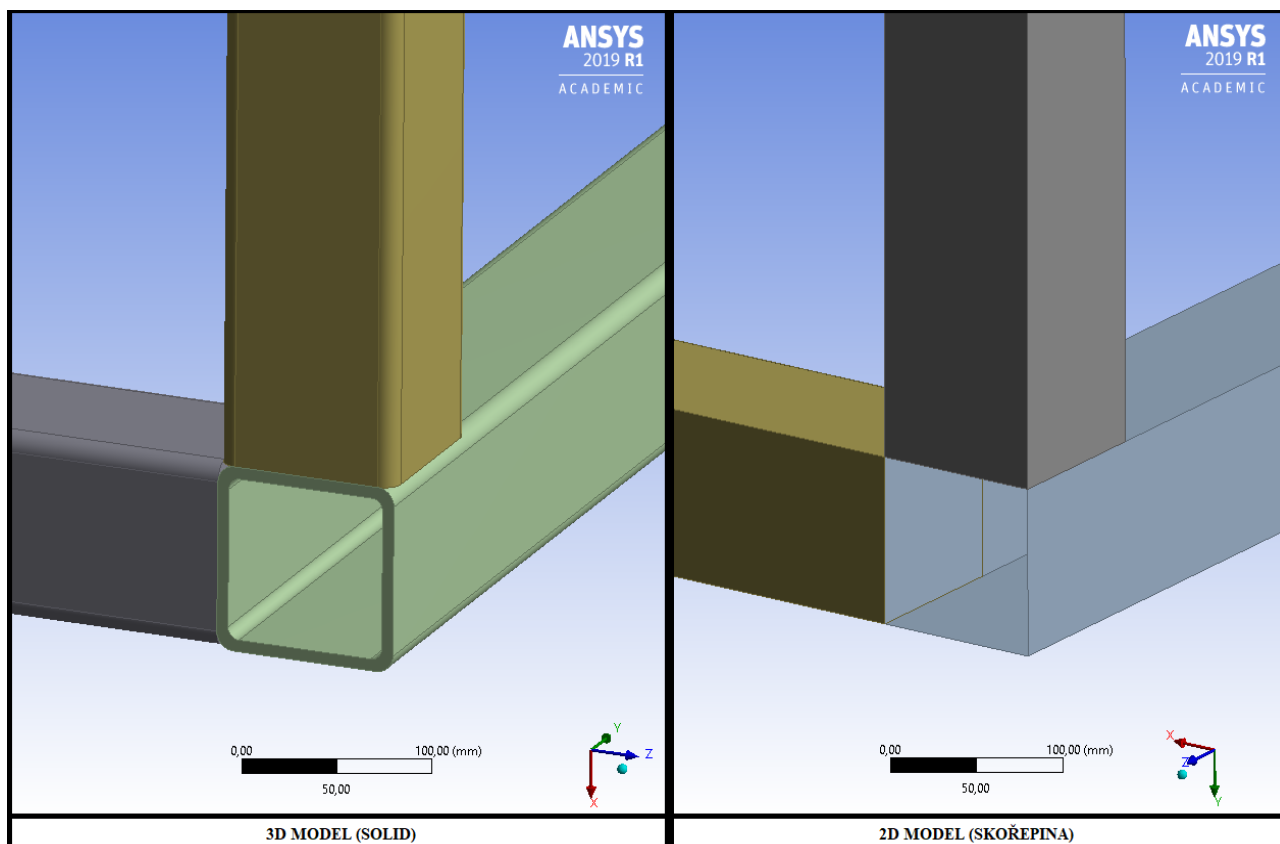
6 ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

Pro vypracování analýzy konečno-prvkovou metodou byl dodán 3D model atrakce formou *step* souboru. Model byl převeden do prostředí *ANSYS WorkBench 2019R1*. V prostředí *DesignModeler* bylo provedeno měření a současně byl vytvářen zjednodušený model konstrukce atrakce pro analýzu.

Z dodaného 3D modelu byl vytvořen zjednodušený model. Ten je tvořen tenkostěnnými profily (skořepinami). Skořepinový model využívá 2D plochy pro zjednodušení výpočtové sítě, na rozdíl od 3D modelu (solidu), který vyvábí výpočtovou síť ve třech rozměrech.

U skořepiny se třetí rozměr (tloušťka) zadává v *Mechanicalu* jako parametr, což umožňuje modifikovat model pro další výpočtové kontroly. Za předpokladu, že pevnostní analýza nevyhovuje, se normalizovaný materiál změní na jinou tloušťku.

U skořepinového modelu byly odstraněny veškeré sražení, ložiska, kladkostroj, čepy, šrouby a další strojní součásti. Vizuelní porovnání skutečného a skořepinového modelu lze vidět na Obr. 6.1.



Obr. 6.1 – Porovnání skutečného a skořepinového modelu

6.1 GEOMETRICKÝ MODEL

Jak bylo popsáno na začátku kapitoly analýza metodou konečných prvků, dodaný 3D model byl převeden v *DesignModeleru* na tenkostěnný model.

Byly vymodelovány 3 hlavní konstrukčních prvky (koruna atrakce, věž atrakce a návěs). Konstrukční prvky byly spojeny vazbami a kontakty (viz. kap. 6.2).

Vymodelované konstrukční prvky atrakce:

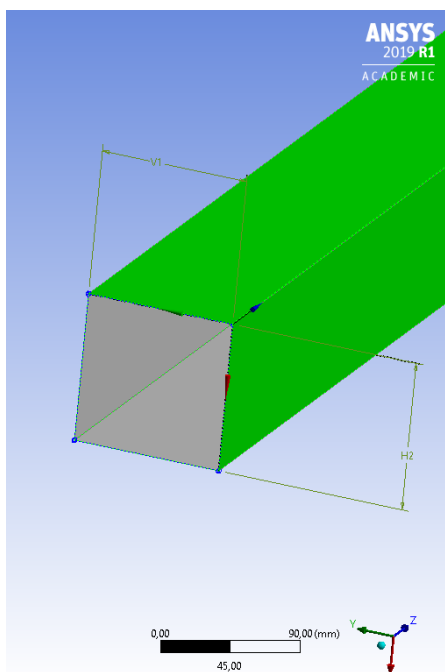
- ❖ *koruna atrakce* ... viz. Obr. 6.1.1.1
 - kabina koruny ... viz. Obr. 6.1.1.2
 - nerotující pohyblivý rám ... viz. Obr. 6.1.1.3
 - rotující rám (klec) ... viz. Obr. 6.1.1.4
 - ramena koruny ... viz. Obr. 6.1.1.5
- ❖ *věž atrakce* ... viz. Obr. 6.1.1.6
 - spodní část věže ... viz. Obr. 6.1.1.7
 - horní část věže ... viz. Obr. 6.1.1.8
 - trojúhelníkový kloubový mechanismus ... viz. Obr. 6.1.1.9
 - písty ... viz. Obr. 6.1.1.10
- ❖ *návěs* ... viz. Obr. 6.1.1.11
 - podvozek ... viz. Obr. 6.1.1.12
 - noha... viz. Obr. 6.1.1.13
 - rám ... viz. Obr. 6.1.1.14

Vytvoření skořepinového prvku

Při překreslování 3D modelu do skořepin je důležité si uvědomit, jestli se součást bude měřit od vnitřní nebo vnější strany plochy profilu. U přiřazování tloušťky v *Mechanicalu* je možnost si vybrat, jakým způsobem se tloušťka přiřadí. U skořepinového modelu jsou strany označeny jako *Top* a *Bottom*. Pokud se plocha „rozsvítí“ zeleně (viz. Obr. 6.1.1), znamená to, že plocha je *Bottom* a platí přiřazovací znaky níže uvedené.

Možnosti přiřazení tloušťky:

- *Bottom* (Dovnitř),
- *Middle* (Souměrně od středu),
- *Top* (Ven).



Obr. 6.1.1 – Skořepinový model jeklu

Details of Extrude1	
Extrude	Extrude1
Geometry	Sketch1
Operation	Add Frozen
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	14300 mm
As Thin/Surface?	Yes
<input type="checkbox"/> FD2, Inward Thickness (>=0)	0 mm
<input type="checkbox"/> FD3, Outward Thickness (>=0)	0 mm
Merge Topology?	Yes
Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch1

Obr. 6.1.2 – Tabulka pro definici vysunutí (Extrude)

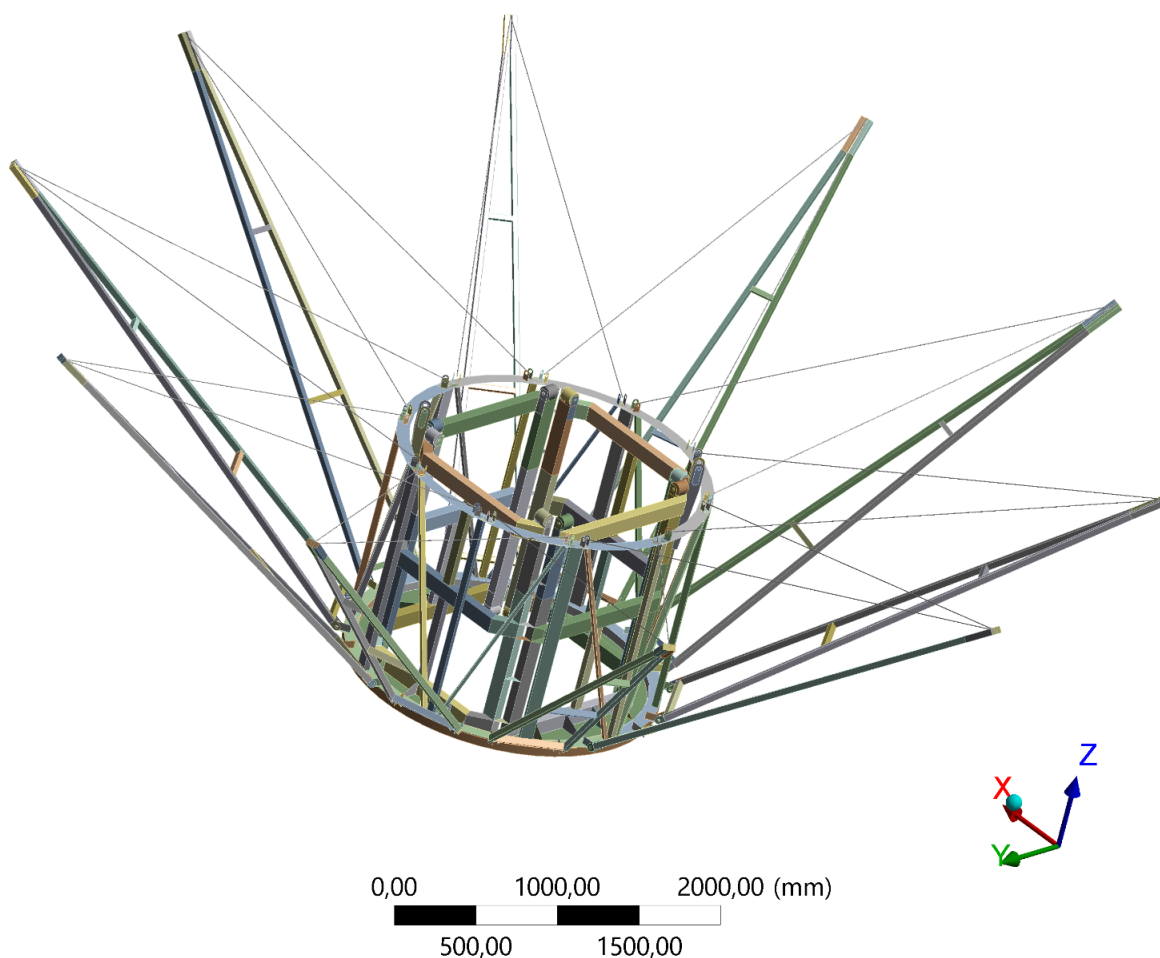
Z obr. 6.1.2 lze vidět vysunutí *sketch 1* a přiřazení jako *add frozen*. *Add frozen* je definován tak, že vysouvající část obrazce (*sketch*) nebude sloučena s ostatními modely do jednoho celku. Dále lze vidět, že model je vysouván po normále směru Z o délku 14300 mm. Důležitý parametr v Obr. 6.1.2 je *as Thin/Surface*. Tento parametr vytváří tenkostěnný prvek o tloušťce 0 mm.

Popsaným způsobem byly vymodelovány jednotlivé prvky konstrukce. První byla modelována horní a dolní věž s kloubovým mechanismem, následně byla vymodelována konstrukce návěsu. Poslední částí modelu byla koruna atrakce, která byla nahrána do skořepinového modelu.

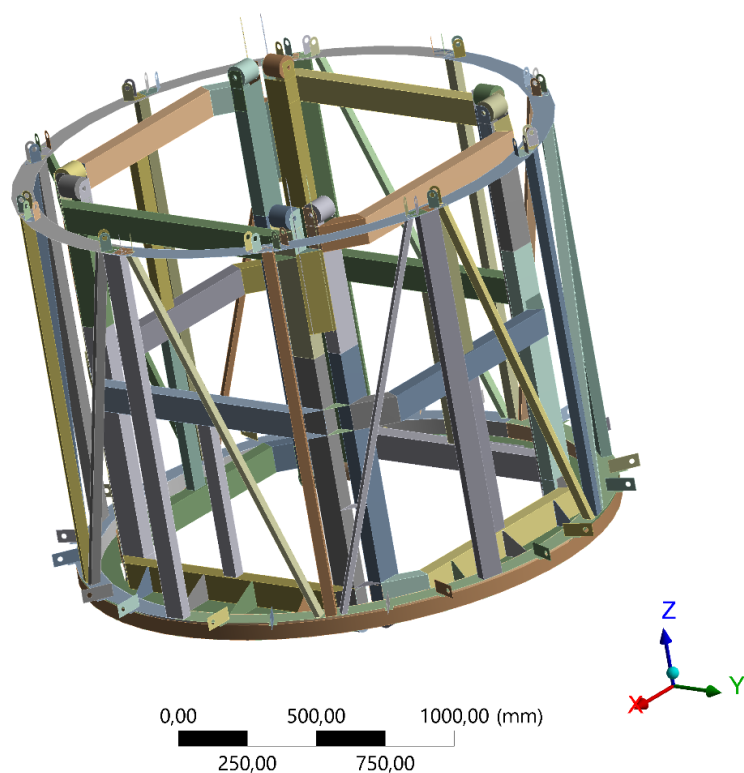
6.1.1 VYMODELOVANÉ ČÁSTI KONSTRUKCE

Tři základní charakteristické konstrukční prvky jsou koruna atrakce Obr. 6.1.1.1, věž atrakce Obr. 6.1.1.6 a návěs atrakce Obr. 6.1.1.11. Celá sestava zjednodušeného modelu viz. Obr. 6.1.3.

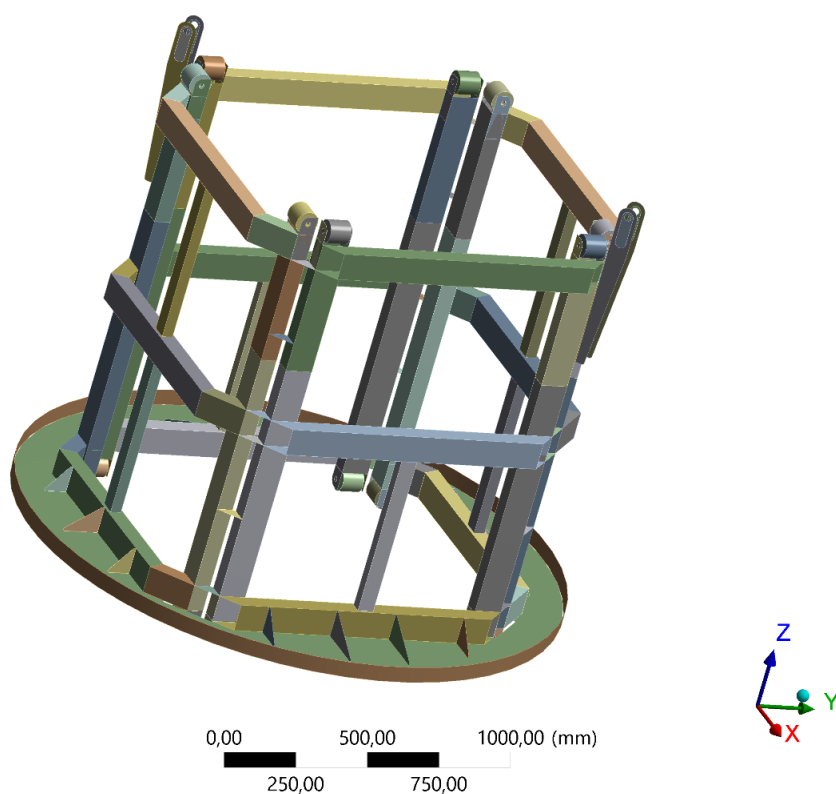
6.1.1.1 KORUNA ATRAKCE



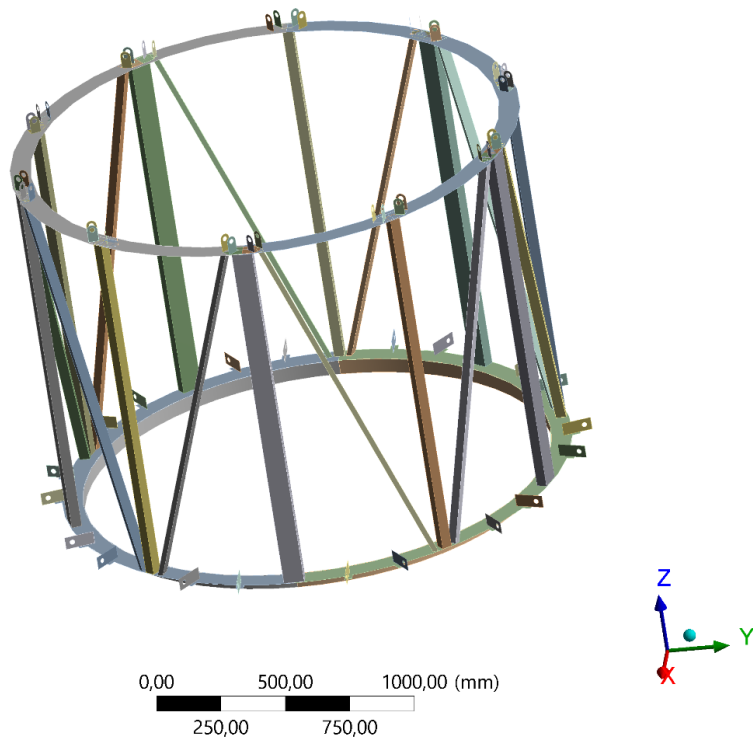
Obr. 6.1.1.1 – Koruna atrakce



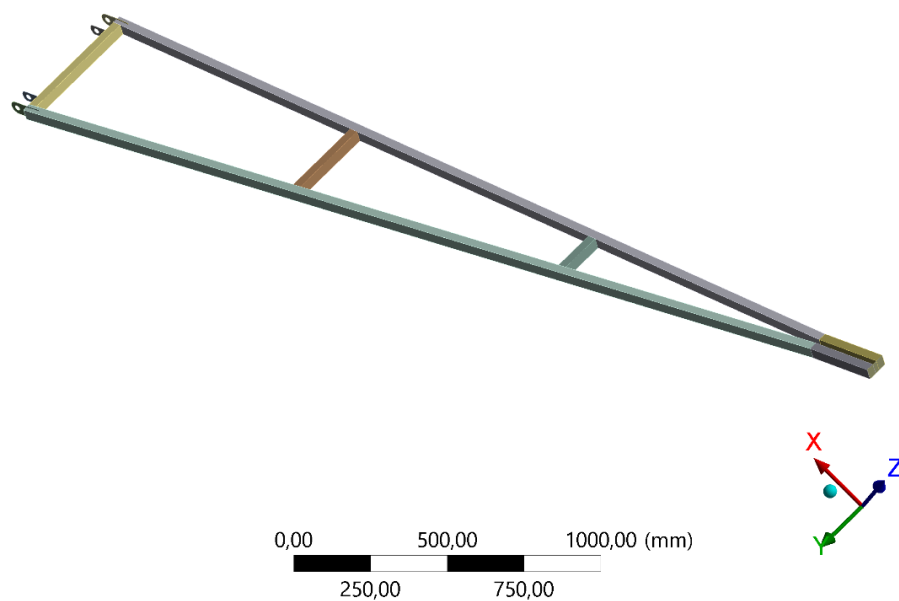
Obr. 6.1.1.2 – Kabina koruny (složena z pohyblivého a rotujícího rámu)



Obr. 6.1.1.3 – Nerotující pohyblivý rám

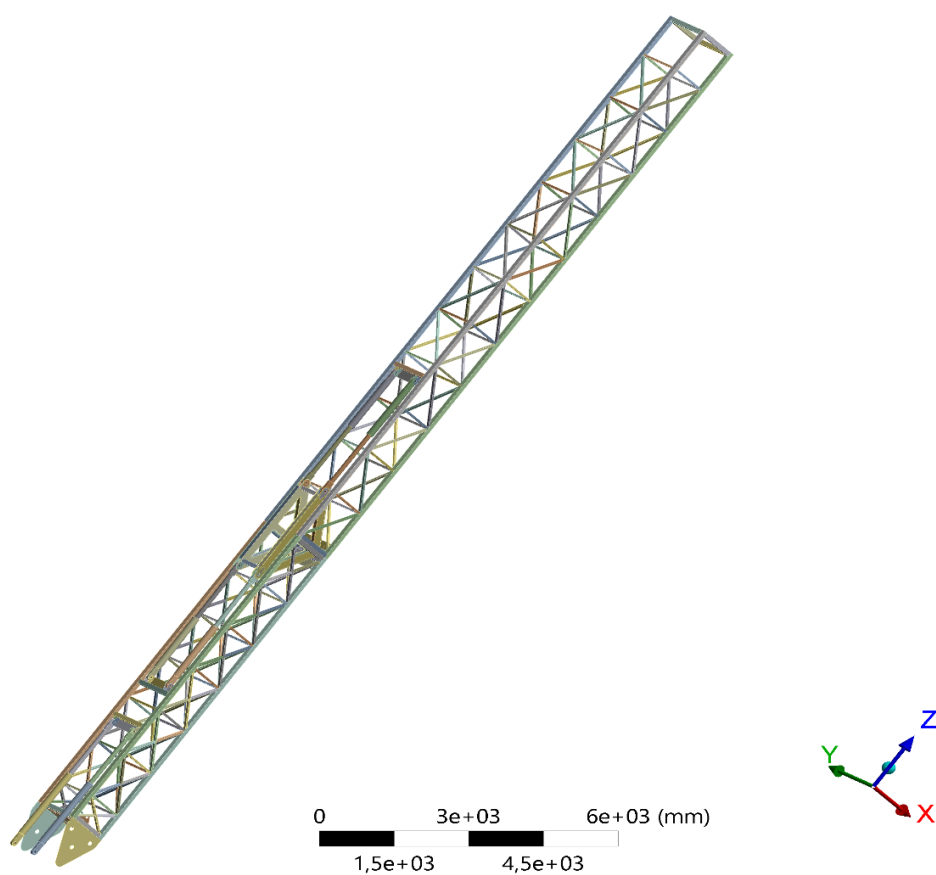


Obr. 6.1.1.4 – Rotující rám (klec)

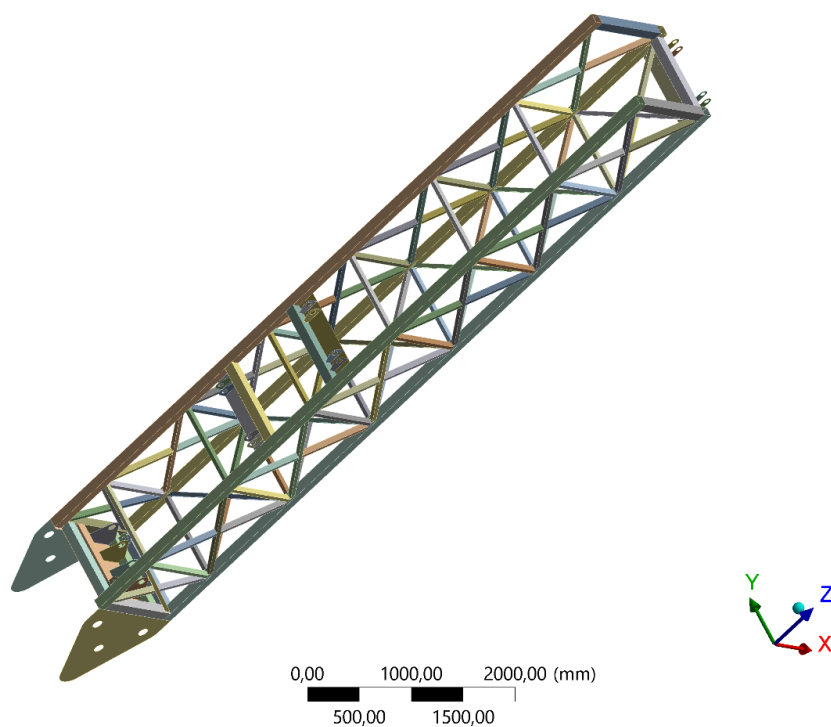


Obr. 6.1.1.5 – Rameno koruny

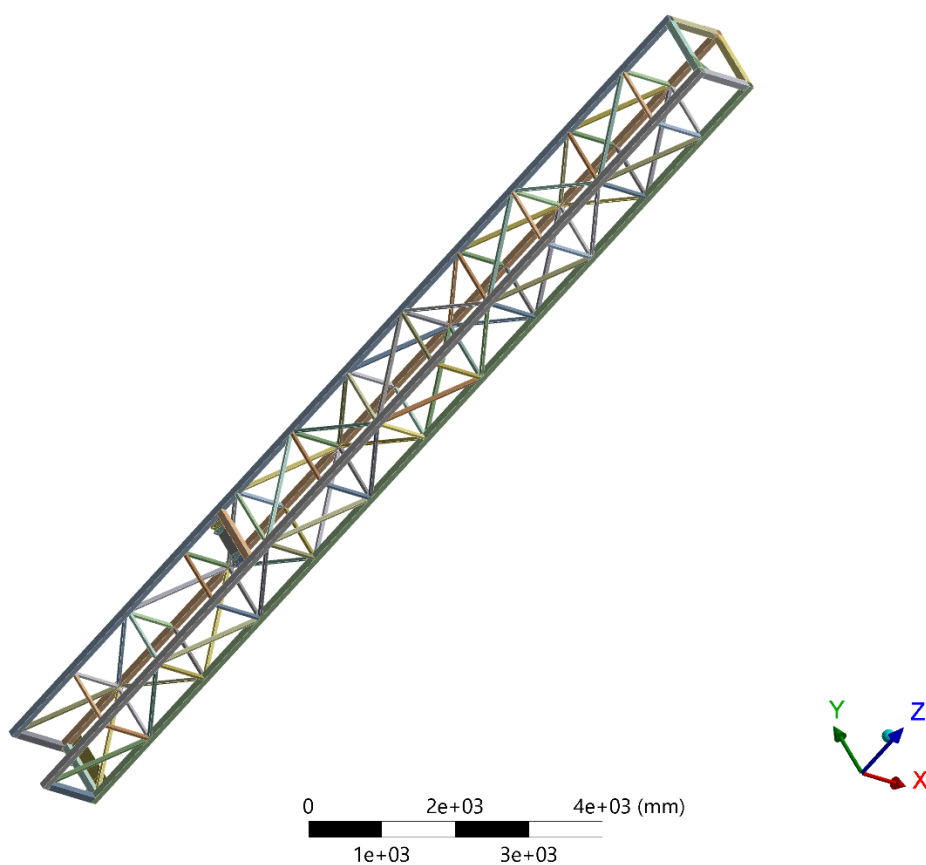
6.1.1.2 VĚŽ ATRAKCE



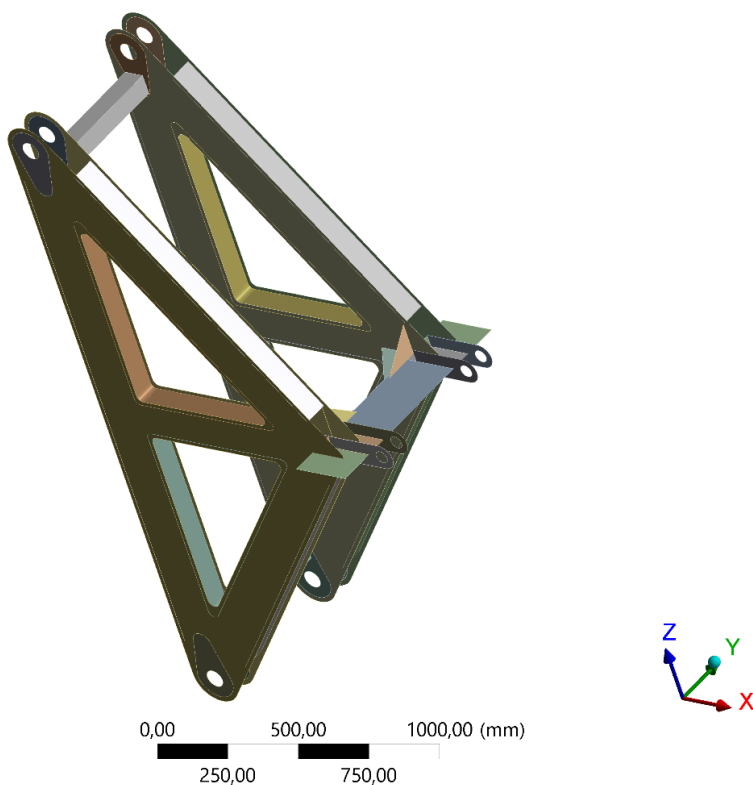
Obr. 6.1.1.6 – Věž atrakce



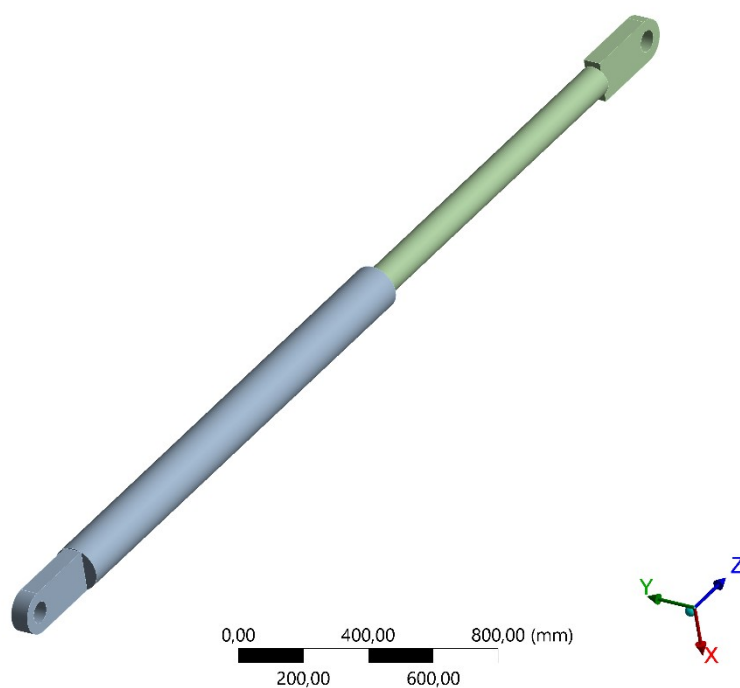
Obr. 6.1.1.7 – Spodní část věže



Obr. 6.1.1.8 – Horní část věže

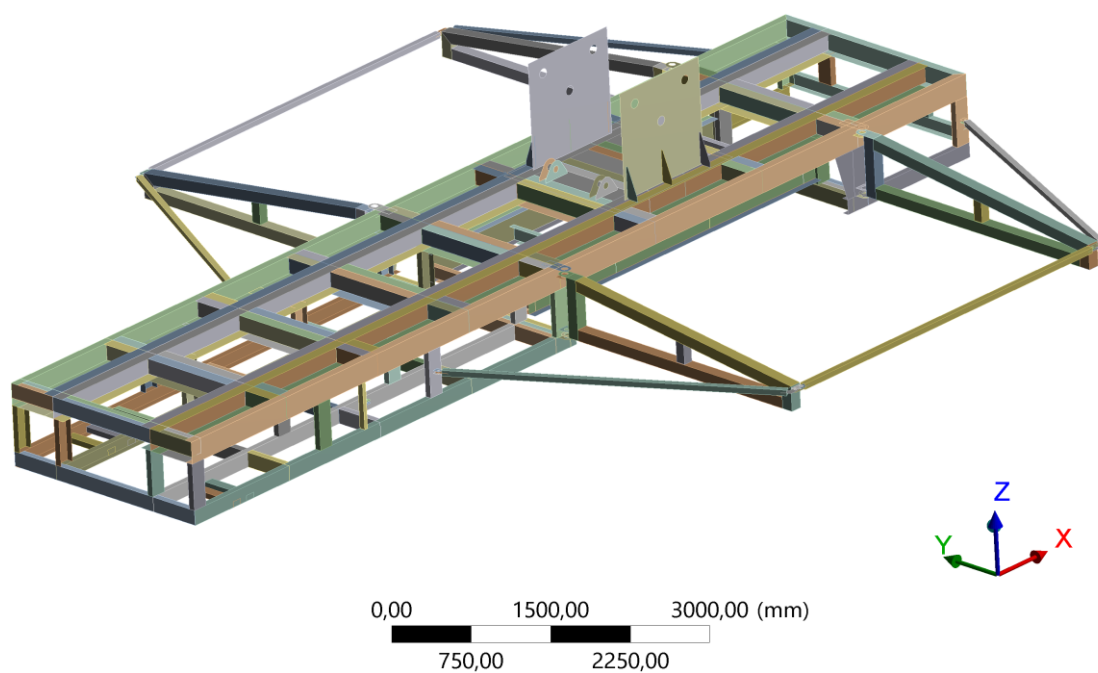


Obr. 6.1.1.9 – Trojúhelníkový kloubový mechanismus

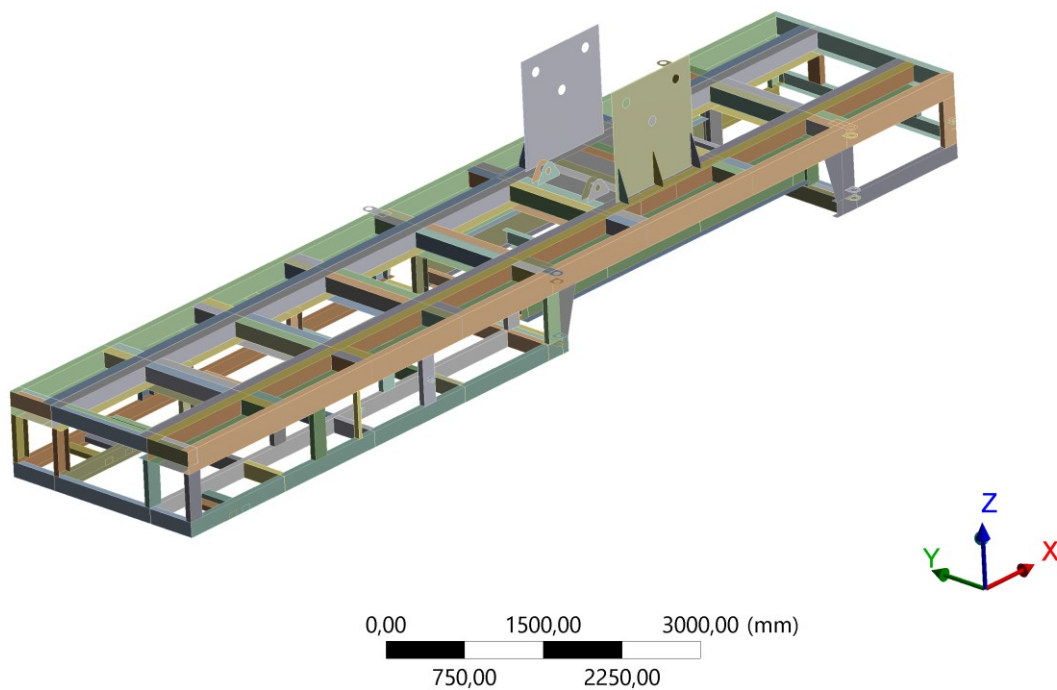


Obr. 6.1.1.10 – Píst (solidové těleso)

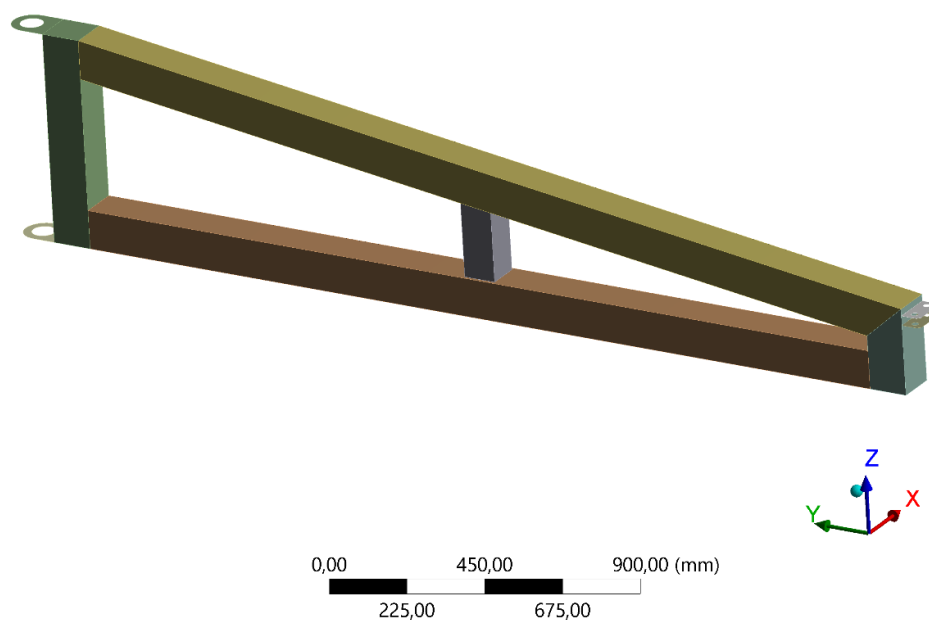
6.1.1.3 NÁVĚS



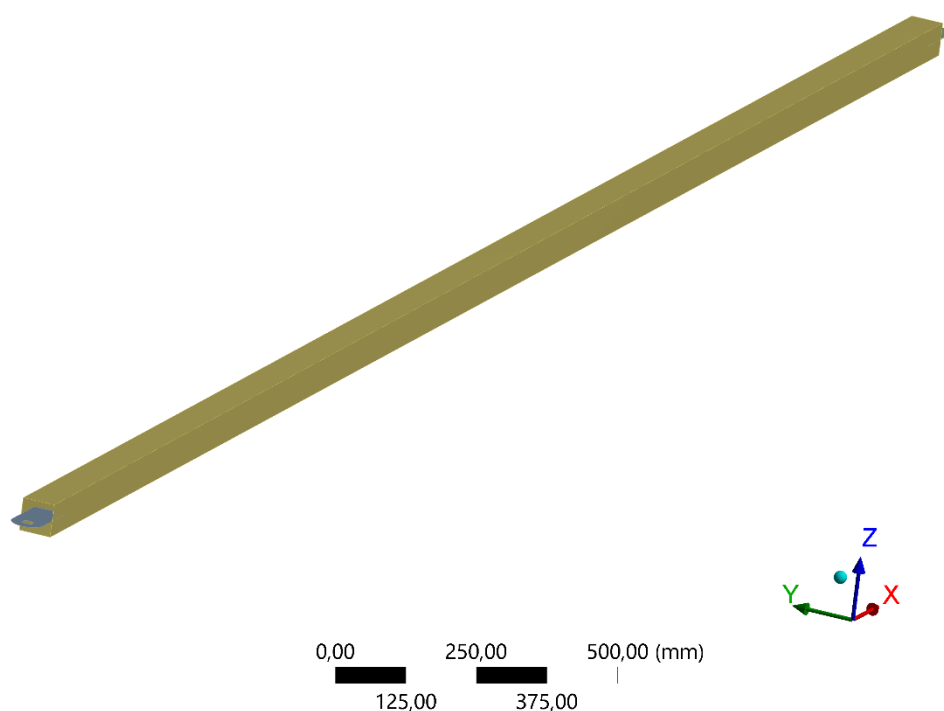
Obr. 6.1.1.11 – Návěs



Obr. 6.1.1.12 – Podvozek

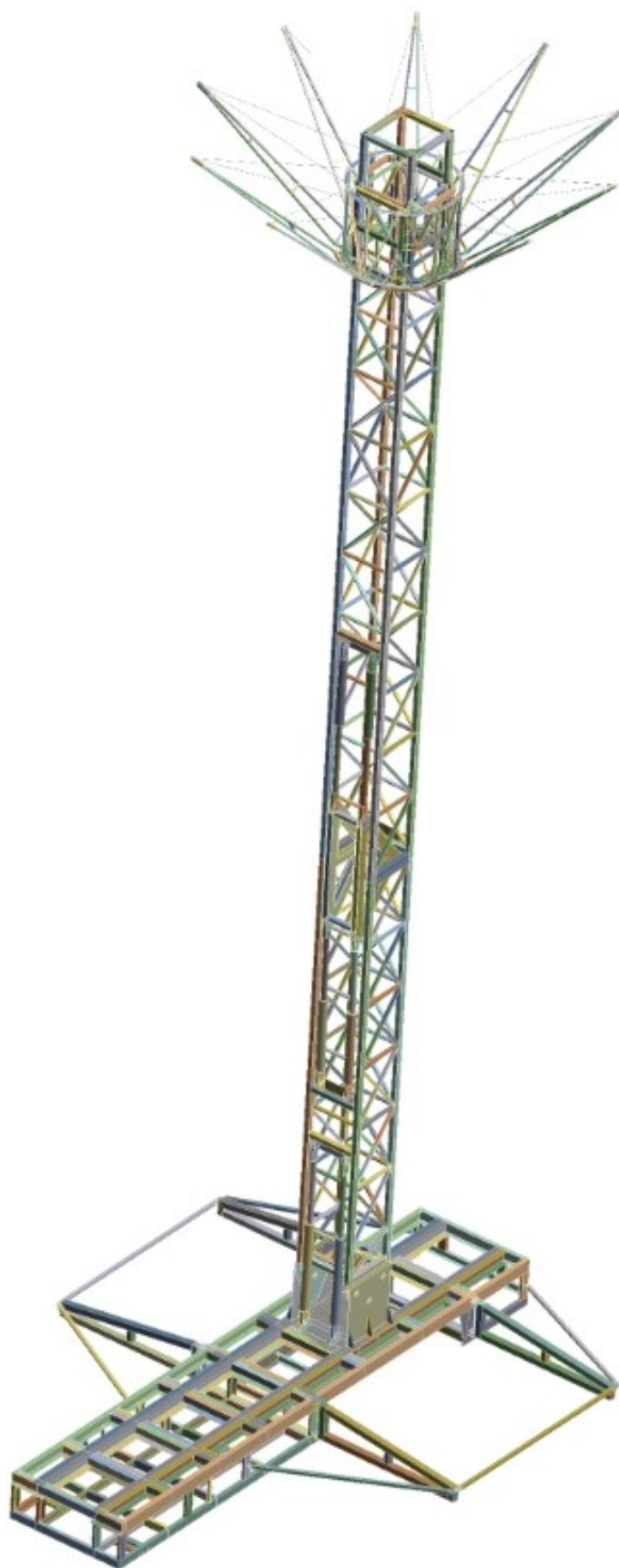


Obr. 6.1.1.13 – Noha návěsu



Obr. 6.1.1.14 – Rám okolo návěsu

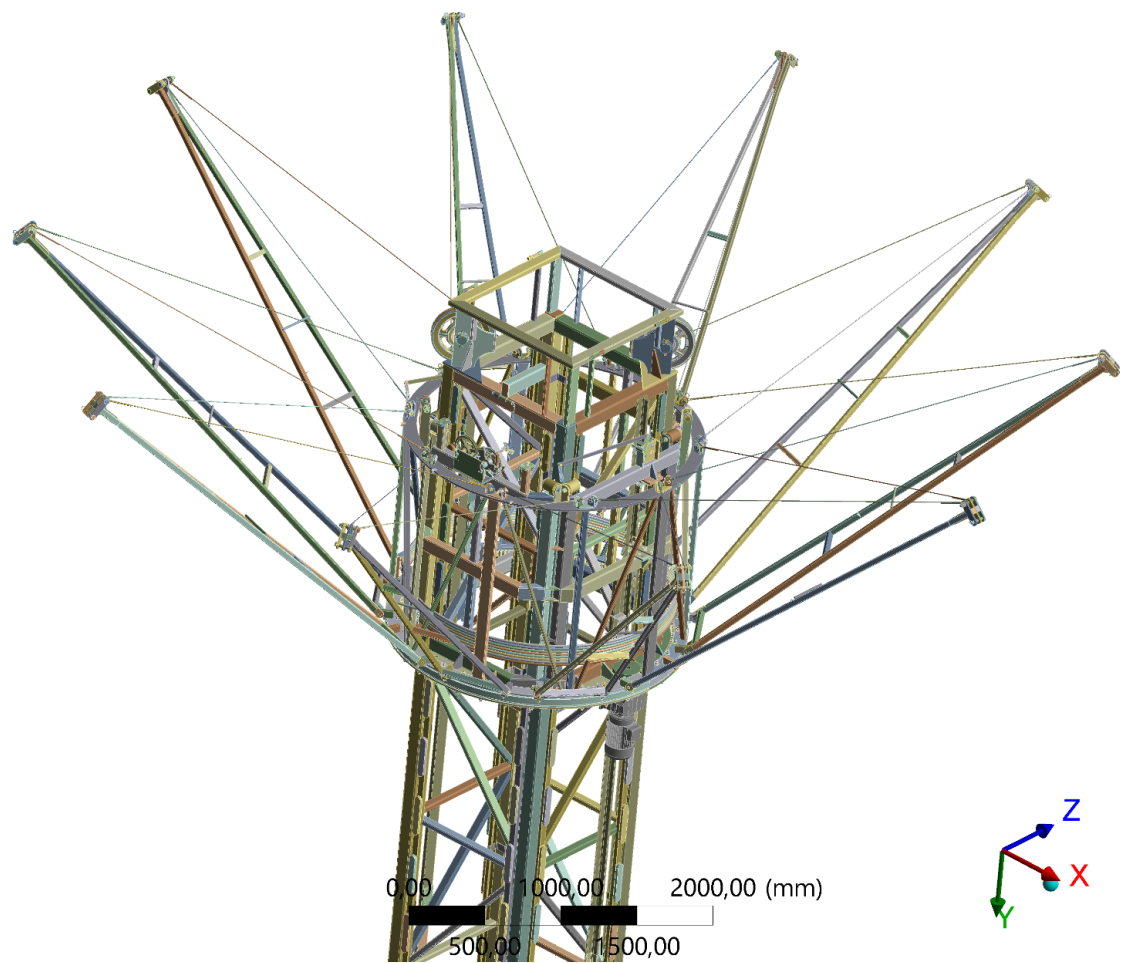
U Obr. 6.1.3 a 6.1.4 lze porovnat zjednodušený tenkostěnný model pro analýzu s původním 3D modelem. Na první pohled je vidět, že konstrukční prvky jsou zachovány, ale byly odstraněny strojní součásti, které nejsou pevnostně analyzovány (viz. detail na korunu atrakce Obr. 6.1.5). Při modelování bylo zjištěno, že konstruktér u dodaného modelu zanechával konstrukční nedostatky. Tyto nedostatky se projeví jako mezery pro svary.



Obr. 6.1.3 – Zjednodušený model atrakce



Obr. 6.1.4 – Dodaný model atrakce



Obr. 6.1.5 – Detail na korunu věže z dodané geometrie

6.2 VAZBY A KONTAKTY

Vytvořená geometrie vznikla z 32 vymodelovaných těles. Aby bylo možné provést výpočetní analýzu, je důležité, aby tato tělesa byla ve výpočetním modelu spojena. Ke spojení bylo použito kontaktů a vazeb. Kontakt by se dal definovat jako typ interakce mezi jednotlivými tělesy, popř. elementy v počítaném modelu.

Pro vytvoření spojení bylo využito kontaktů typu *Bonded*. Využitím tohoto typu kontaktu je utvořen „svařenec“, jeden celistvý kus. Výhodou i nevýhodou je, že tvořená síť v různých geometriích nemusí být na sebe vázána. Tato situace může způsobit nepřesný výsledek, ale v některých případech by síť nešlo vytvořit. Tvořená síť má rychlejší generaci i výpočet.

Při tvorbě „svařence“ se vytvoří kontaktní složka, ve které se nadefinuje počet těles, toleranční mezera a spojení pomocí (*face/face*; *face/edge*; *edge/edge*). Toleranční mezera *Tolerance Value* byla nastavena na 1 mm, tzn. že software spojí všechny plochy i čáry bližší jak 1 milimetr. Automatickým vygenerováním kontaktních ploch došlo k získání kontaktních spojení u všech 32 těles.

Ve vazebních podmínkách došlo k nahrazení funkčnosti čepů, ložisek, šroubů, svarů atd.

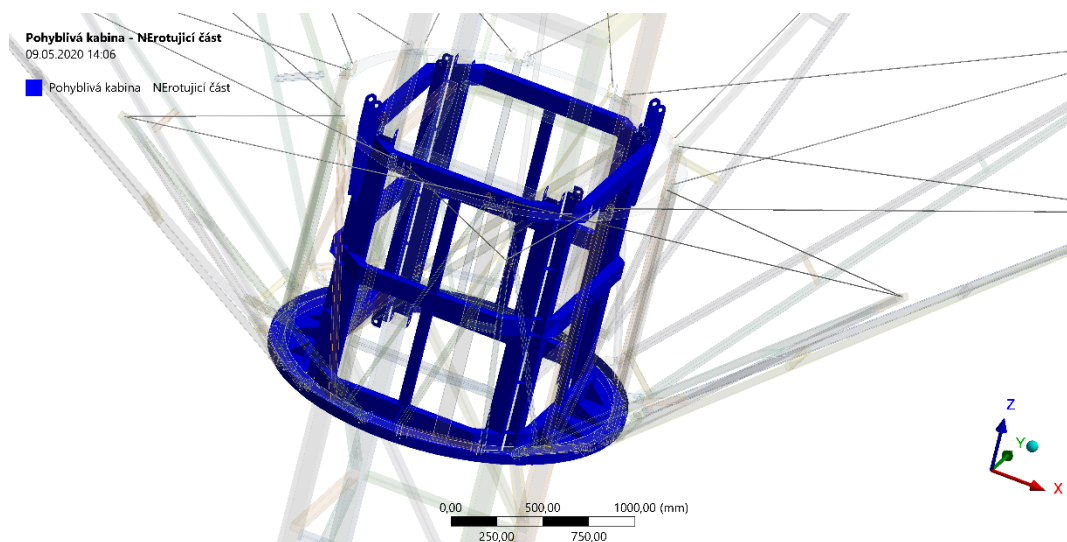
Ze znalosti principu atrakce (rotace, posuvy) byly zavedeny vazby do modelu. Pomocí funkcí *fixed*, *revolute*, *translational*, *general* se nadefinovaly kloubové, rotační a posuvné vazby, které definují přímočaré, rotační a valivé pohyby.

6.2.1 VAZBY A KONTAKTY KORUNY ATRAKCE

6.2.1.1 KONTAKTNÍ SPOJENÍ KORUNY ATRAKCE

Nerotující pohyblivý rám

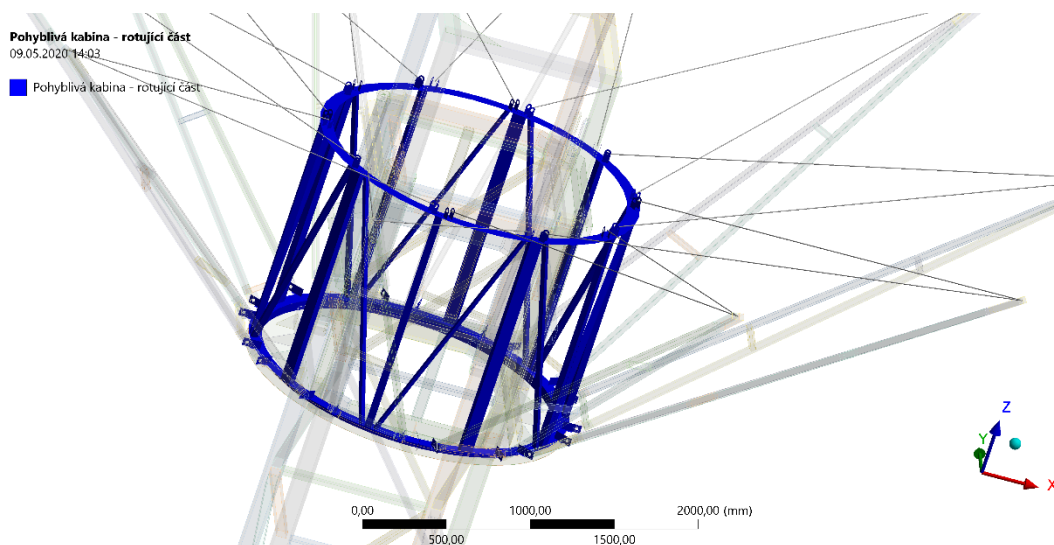
Nerotující pohyblivý rám je jedno těleso (svařenec), které je složeno ze 128 kusů prvků. Na tomto tělese se automaticky vygenerovaly kontakty.



Obr. 6.2.1.1 – Svařenec nerotujícího pohyblivého rámu

Rotující rám (klec)

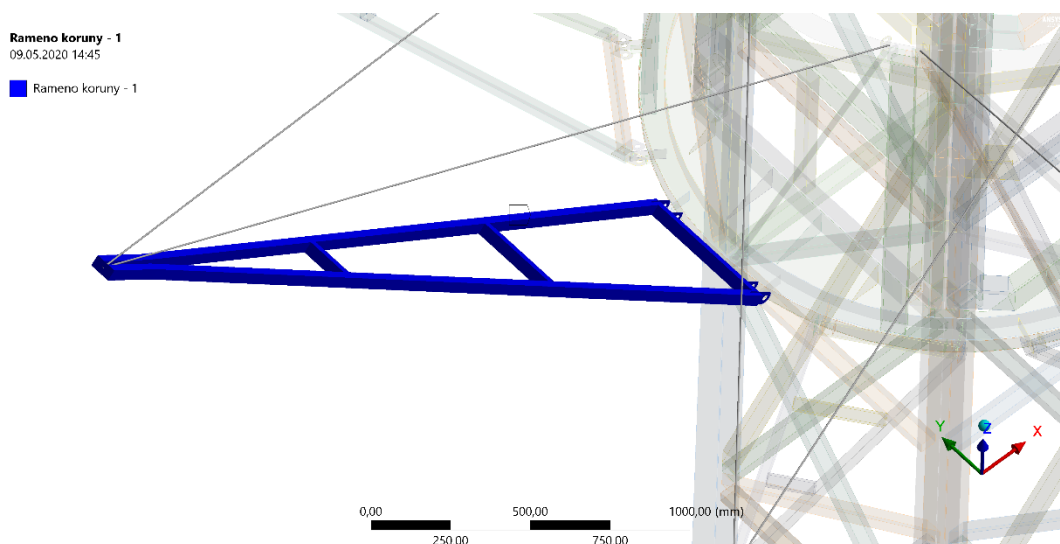
Rotující rám (klec) je svařenec, který je složen ze 106-ti kusů prvků. Na tomto tělese se automaticky vygenerovaly kontakty.



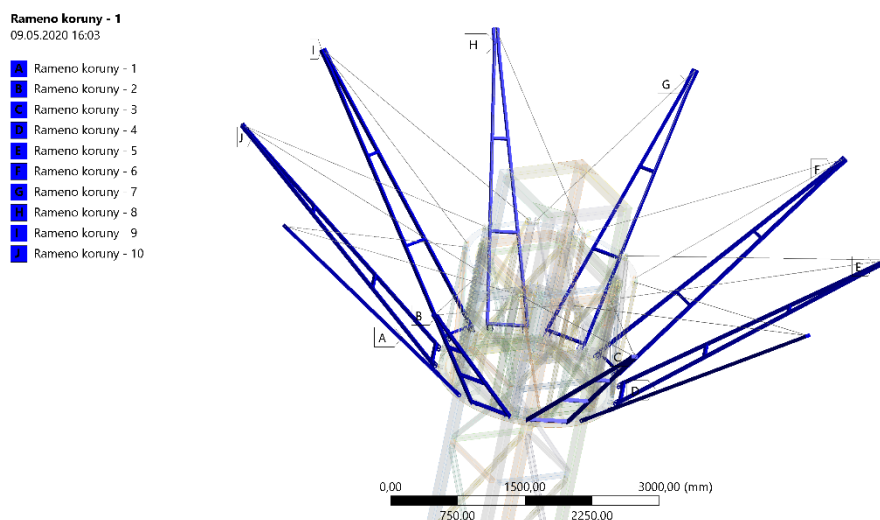
Obr. 6.2.1.2 – Svařenec rotujícího rámu (klece)

Ramena koruny

Rameno koruny je svařenec, který je složen ze 14-ti kusů prvků. Na tomto tělese se automaticky vygenerovaly kontakty. Celou korunu tvoří 10 ramen okolo obvodu klece.



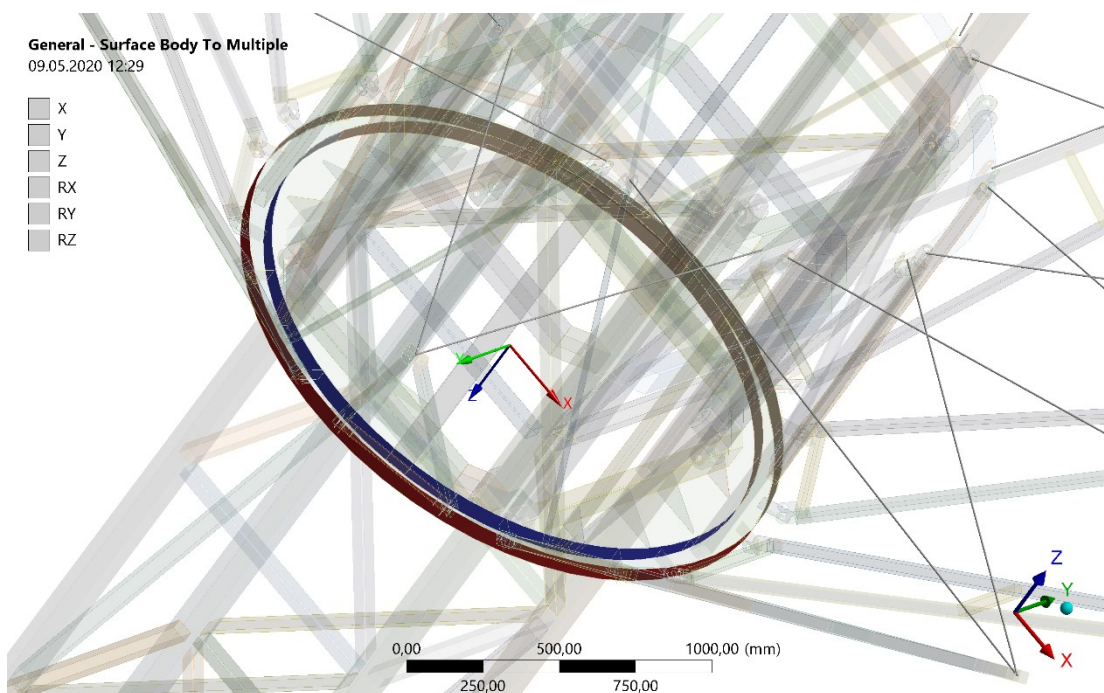
Obr. 6.2.1.3 – Svařenec ramena koruny



Obr. 6.2.1.4 – Ramena okolo klece v počtu 10-ti ks

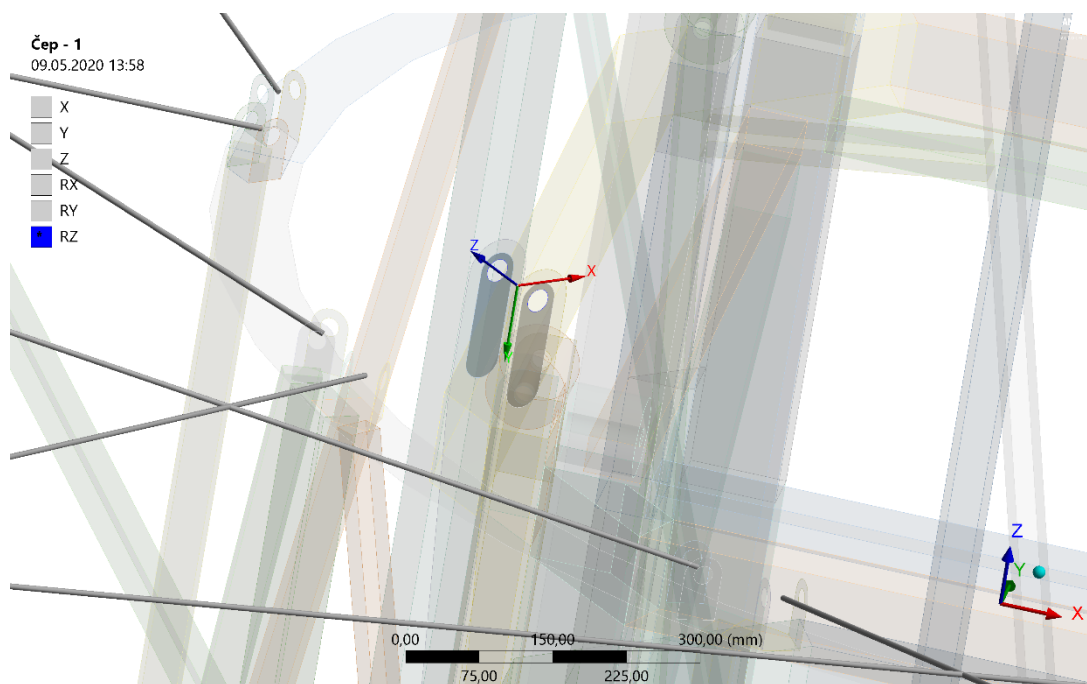
6.2.1.2 VAZEBNÍ SPOJENÍ KORUNY ATRAKCE

Vazby u koruny atrakce hrají důležitou roli při výpočtu. Samotná koruna je vystavena velkému zatížení od osob a větru. Spojení mezi klecí a pohyblivým rámem je tvořeno jedním ložiskem. Ložisko umožňuje rotaci okolo vlastní osy, ale pro výpočet statického vlivu na konstrukci beru ložisko pouze jako spojení mezi povrchem klece a pohyblivým rámem (viz. Obr. 6.2.1.5).



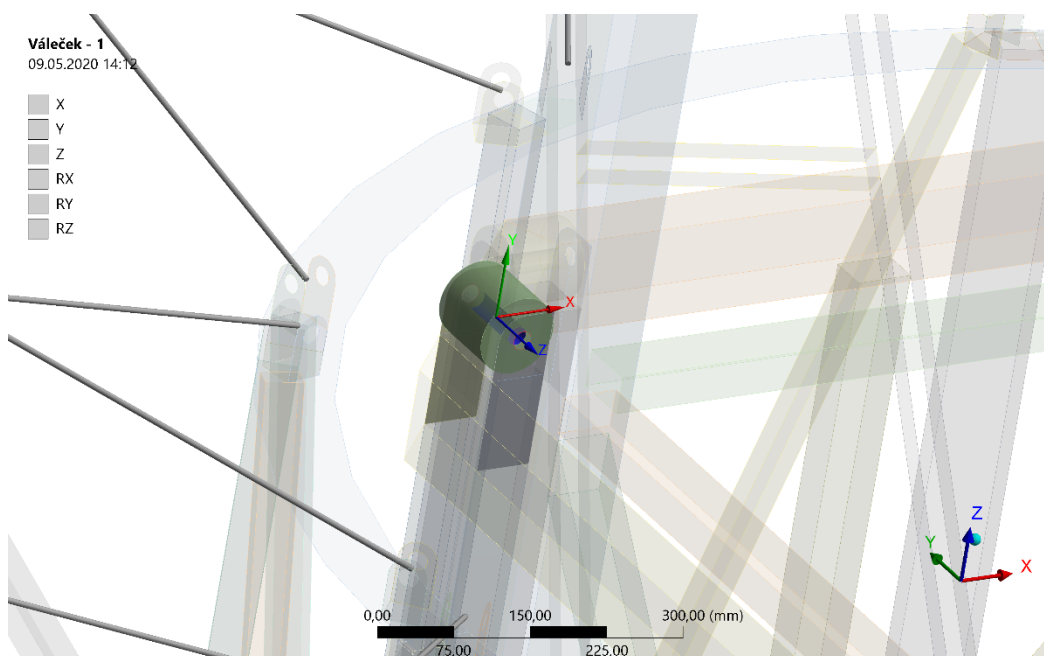
Obr. 6.2.1.5 – Vazba mezi klecí a pohyblivým rámem (Ložisko)

Koruna jako celek je upevněna pomocí lan přes kladkostroj na konstrukci. Síly od koruny působící na věž se zavedou formou okrajových podmínek, koruna byla upevněna do prostoru. Konec lana je upevněn na čepech pohyblivého rámu, to umožňuje rotaci v ose Z (viz. Obr. 6.2.1.6).



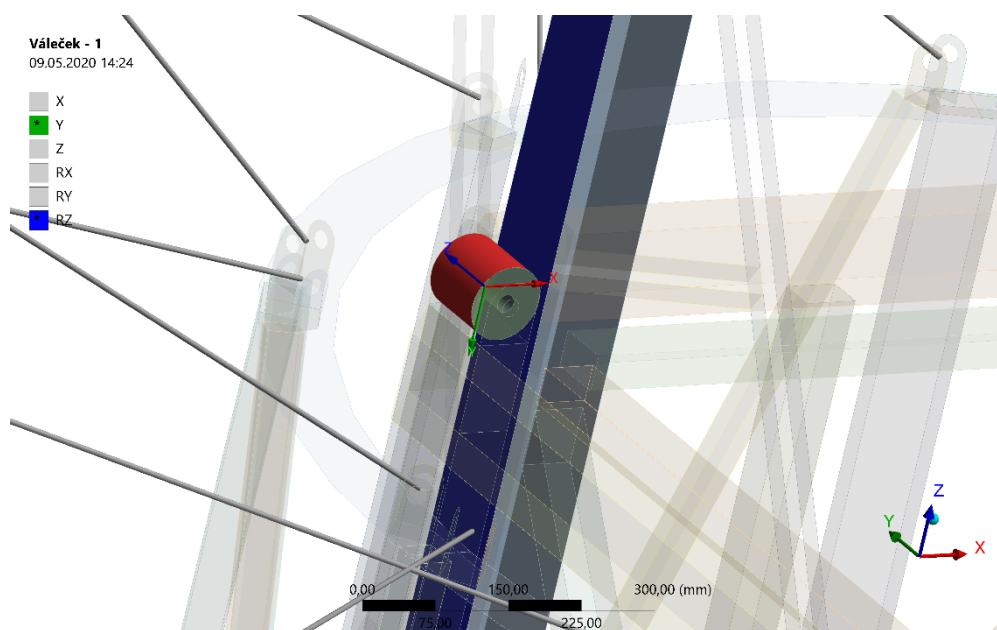
Obr. 6.2.1.6 – Upevnění čepů od pohyblivého rámu do prostoru

Válečky umístěné v pohyblivém rámu slouží k pohybu po věži. Každý váleček je při velkém větru vtlačěn do věže. Válečky mají jednu rotační vazbu a jeden dotyk. Vazba na válečku je rotačního typu, pro statický výpočet není třeba definovat rotační pohyb (viz. Obr. 6.2.1.7).



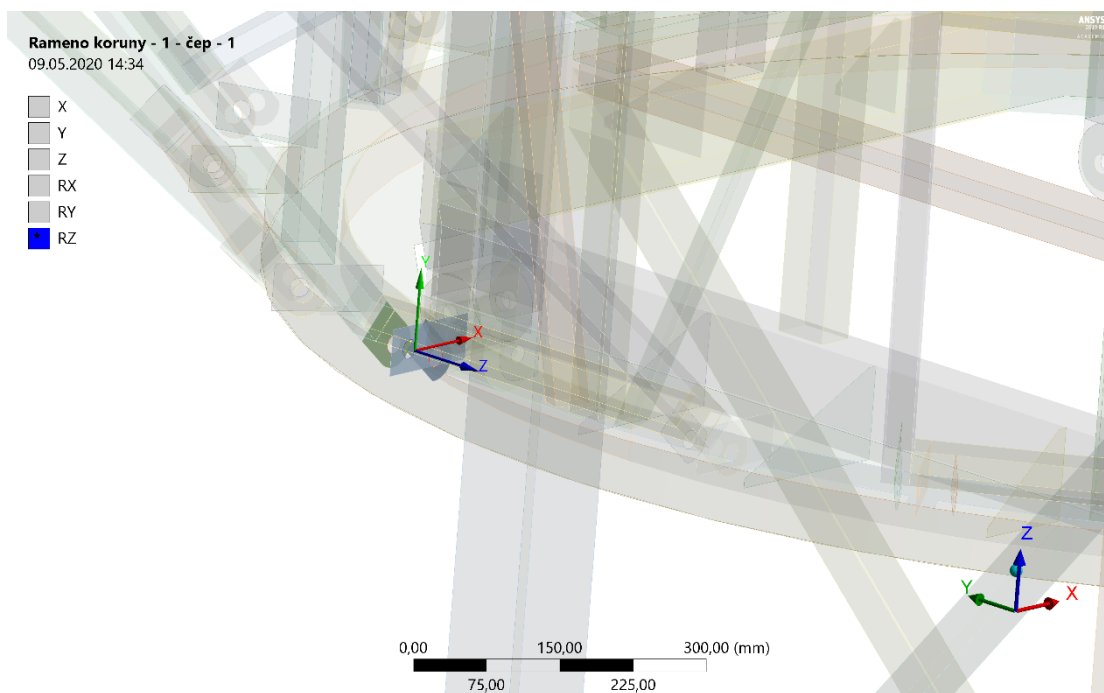
Obr. 6.2.1.7 – Rotační vazba u válečku

Pro přenos síly od větru z koruny do věže je třeba zavést dotyk mezi válečkem a věží. Válečku pomocí *general* umožním pohyb v ose *Y* a rotaci okolo osy *Z* (viz. Obr. 6.2.1.8).



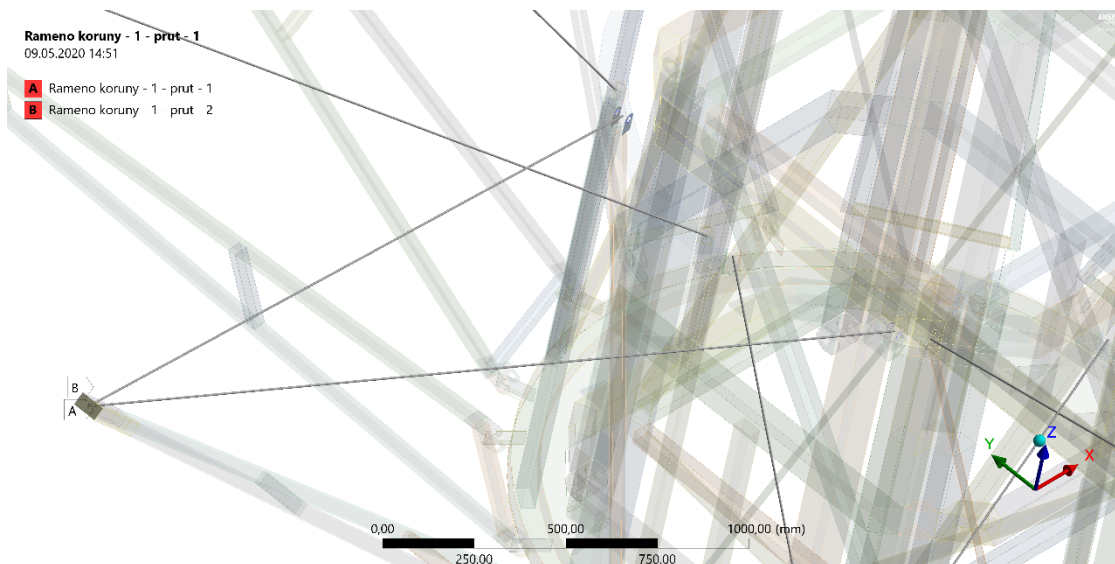
Obr. 6.2.1.8 – Dotyk mezi válečkem a věží

Ramena koruny jsou umístěna na rotačním rámu (kleci), kde každé rameno je spojeno pomocí 2 čepů a 2 prutů. Každý čep umožňuje rotaci okolo vlastní osy Z (viz. Obr. 6.2.1.9).



Obr. 6.2.1.9 – Čepové spojení mezi ramenem a klecí

Aby rameno zůstalo v požadované poloze na čepech, je připevněno pomocí dvou prutů k rotačnímu rámu (viz. Obr. 6.2.1.10).



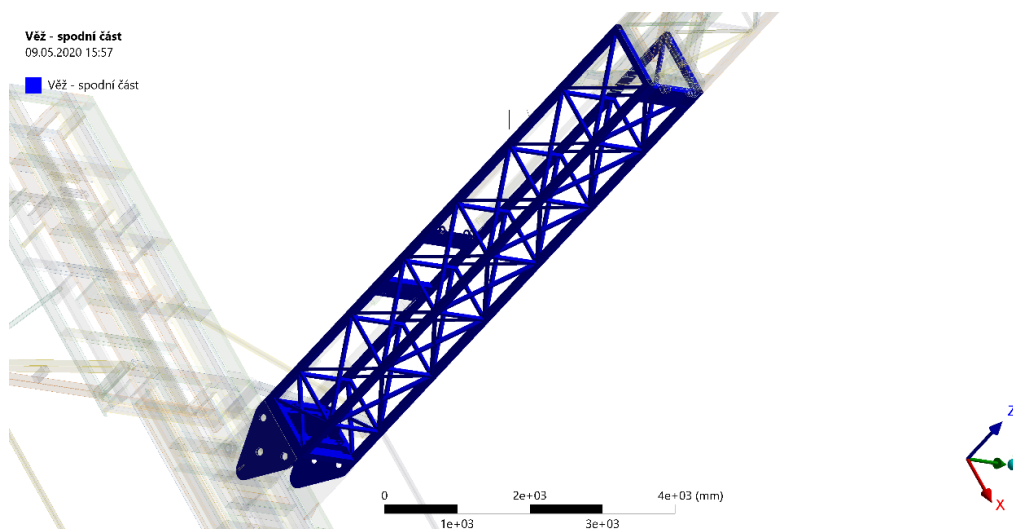
Obr. 6.2.1.10 – Prutové připevnění ramen ke kleci

6.2.2 VAZBY A KONTAKTY VĚŽE ATRAKCE

6.2.2.1 KONTAKTNÍ SPOJENÍ VĚŽE ATRAKCE

Spodní část věže

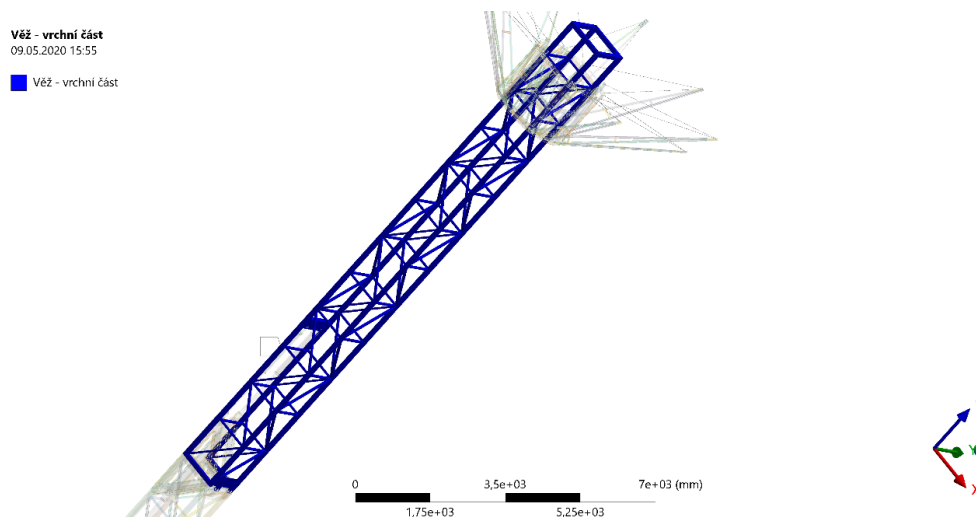
Spodní část věže je jedno těleso (svařenec), které je složeno ze 125-ti kusů prvků. Tak jako u koruny i zde byly automaticky vygenerovány kontakty (viz. Obr. 6.2.2.1).



Obr. 6.2.2.1 – Svařenec spodní části věže

Horní část věže

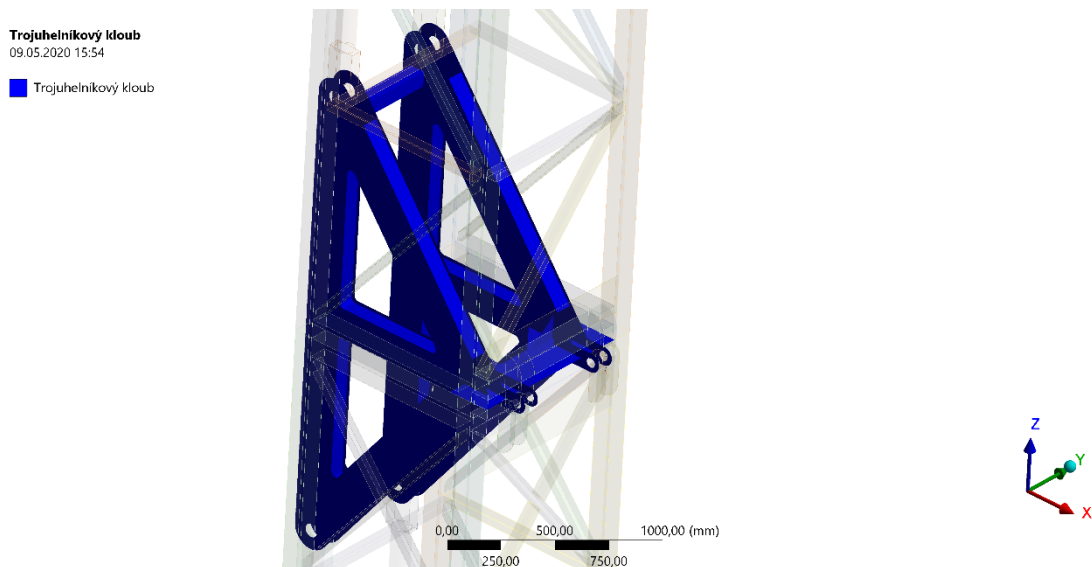
Horní část věže jako svařenec obsahuje 112 prvků konstrukce (viz. Obr. 6.2.2.2). I zde byly automaticky vygenerovány kontakty.



Obr. 6.2.2.2 – Svařenec horní části věže

Trojúhelníkový kloub

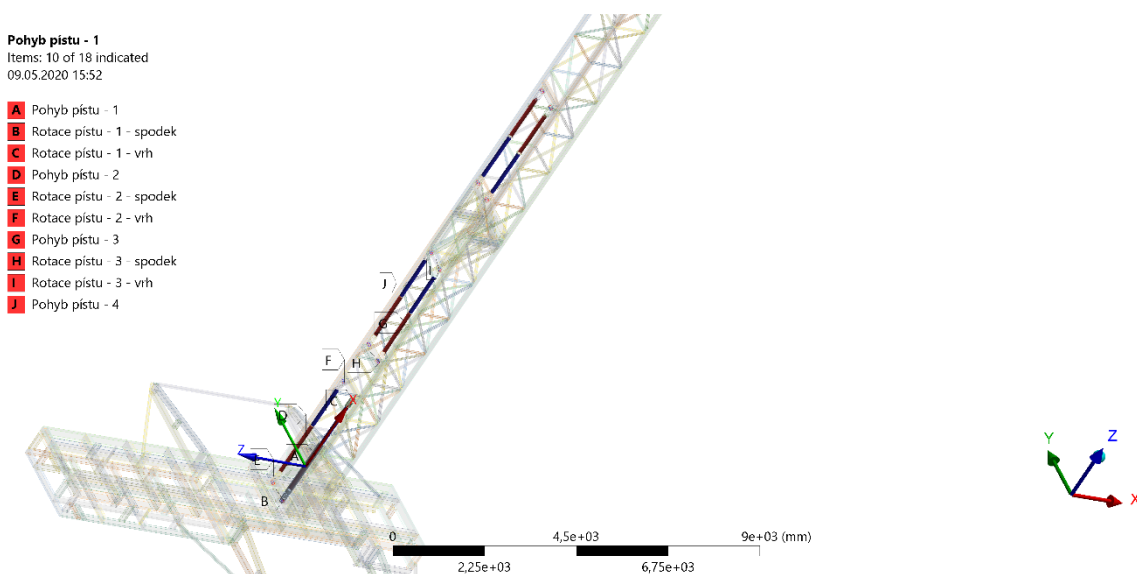
Svařenec trojúhelníkového kloubu obsahuje 39 kusů prvků (viz. Obr. 6.2.2.3).



Obr. 6.2.2.3 – Svařenec trojúhelníkového kloubu

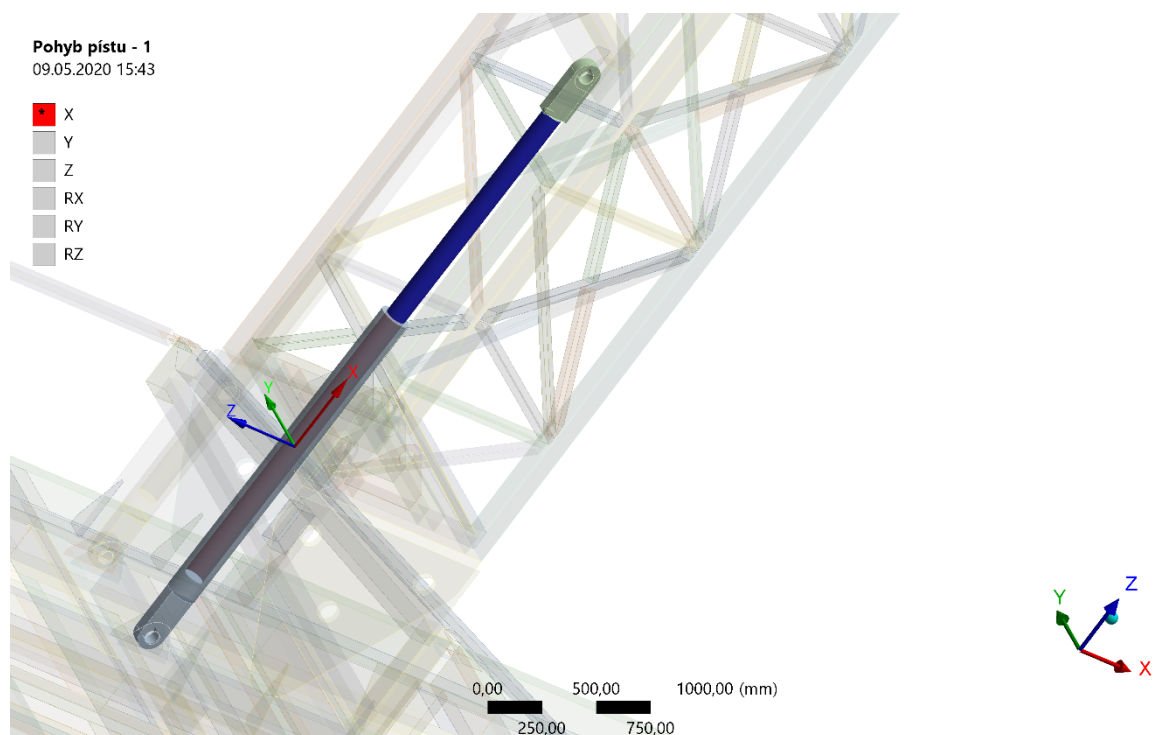
6.2.2.2 VAZEBNÍ SPOJENÍ VĚŽE ATRAKCE

Věž atrakce se skládá ze spodní a horní části věže a trojúhelníkového tělesa. Věže mezi sebou mají vazby, které drží konstrukci v postaveném stavu. Nedílnou součástí jsou písty, které jsou spojeny s trojúhelníkovým kloubem a dvěma částmi věže. Jak bylo již uvedeno, písty zde nemají žádnou funkčnost, ale mohou při postaveném stavu atrakce částečně sloužit jako podpora věže (viz. Obr. 6.2.2.4).



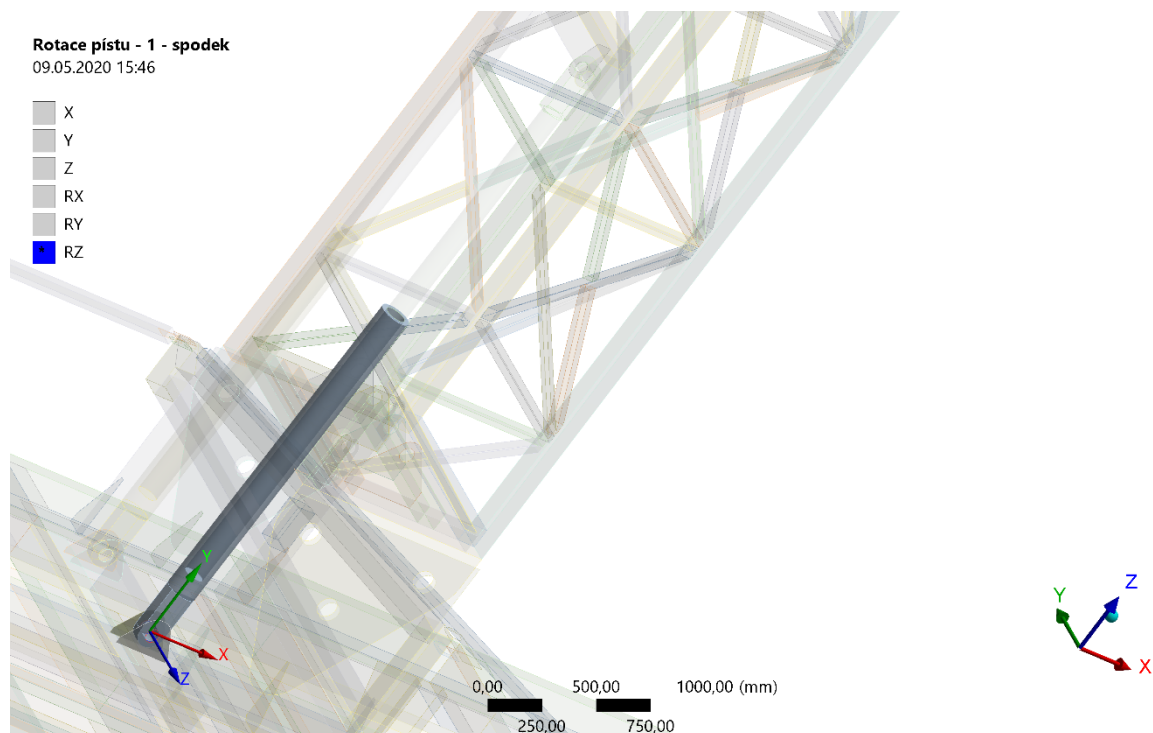
Obr. 6.2.2.4 – Písty

Každý píst má dvě rotační a jednu posuvnou vazbu. Pístu je umožněno pohybovat se po vlastní ose X jak lze vidět na Obr. 6.2.2.5.

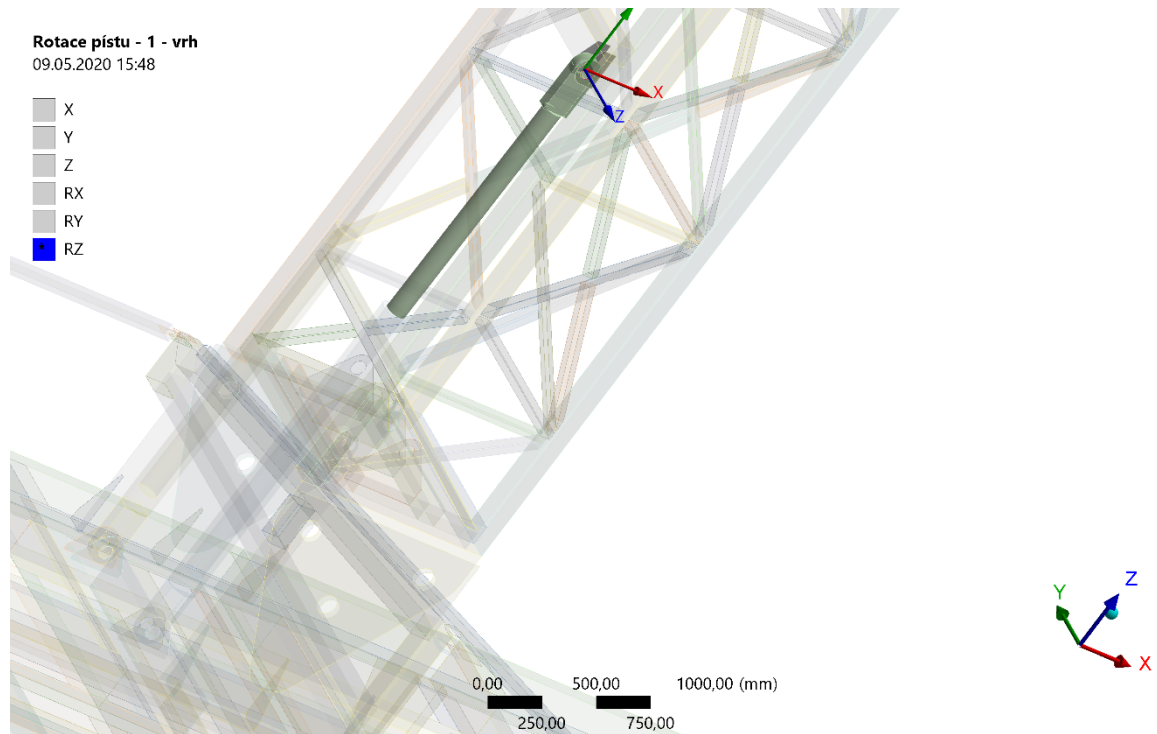


Obr. 6.2.2.5 – Pohyb pístu po vlastní ose X

Rotační vazba čepu je definovaná jako rotace okolo vlastní osy Z (viz. Obr. 6.2.2.6 a 6.2.2.7).

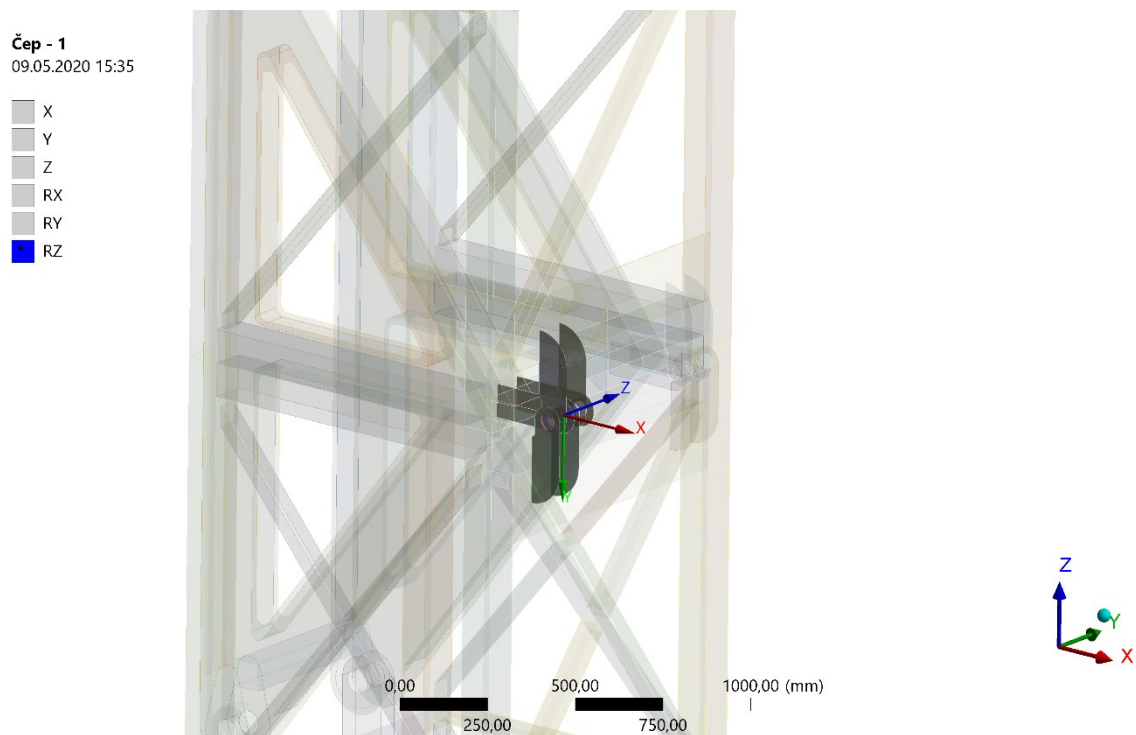


Obr. 6.2.2.6 – Rotace okolo vlastní osy Z spodní části pístu



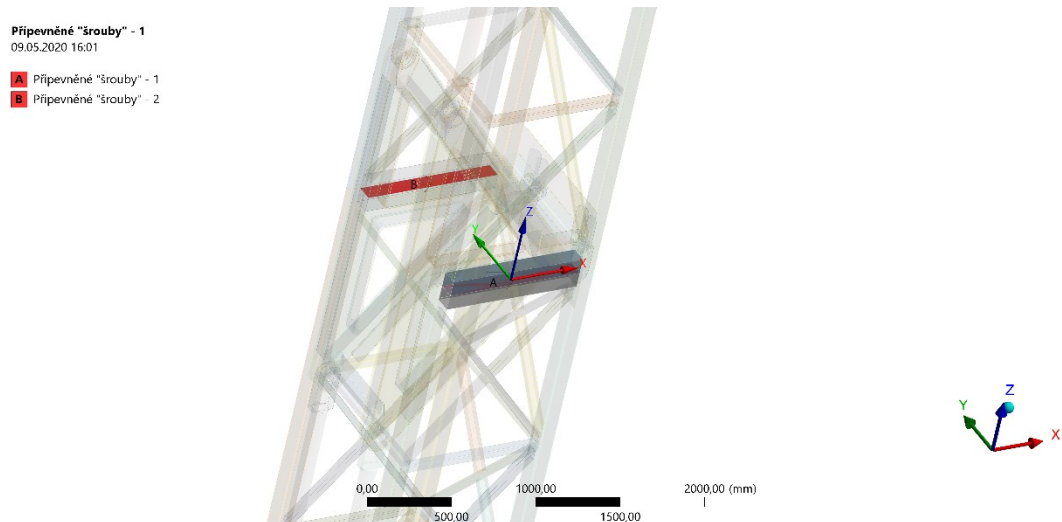
Obr. 6.2.2.7 – Rotace okolo vlastní osy Z horní části pístu

Trojúhelníkový kloub je spojen s oběma částmi věže čepy, ty umožňují rozložení a složení věže.



Obr. 6.2.2.8 – Čepové spojení kloubu s oběma částmi věže

V postaveném stavu, jsou věže k sobě spojeny šrouby. Toto spojení zamezí pohybu mezi oběma částmi věže. Byla použita vazba *fixed* ke spojení dvou ploch na každé straně věže (viz. Obr. 6.2.2.9).



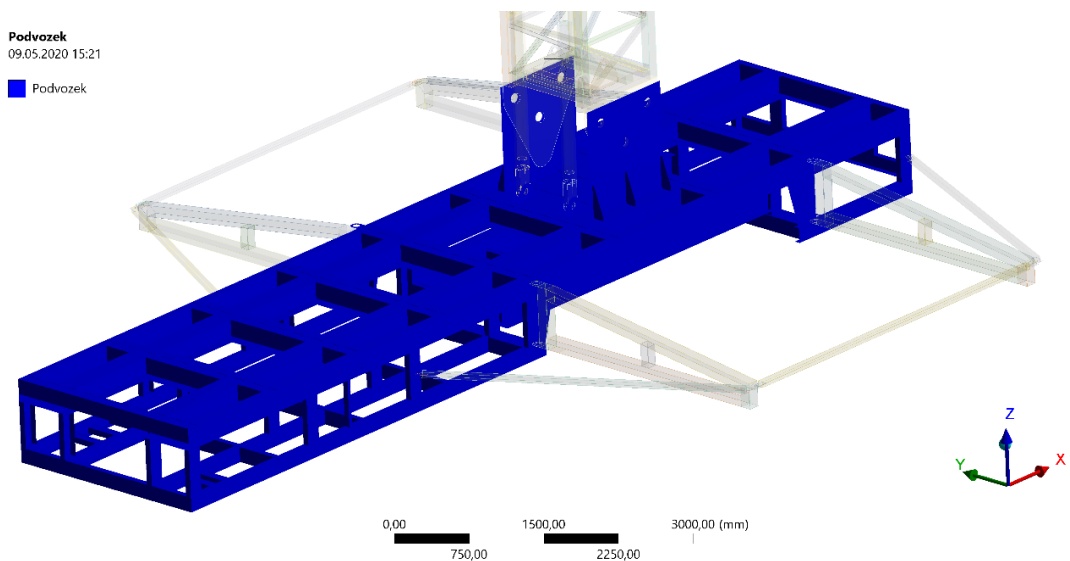
Obr. 6.2.2.9 – Šroubové spojení

6.2.3 VAZBY A KONTAKTY NÁVĚSU

6.2.3.1 KONTAKTNÍ SPOJENÍ NÁVĚSU

Podvozek

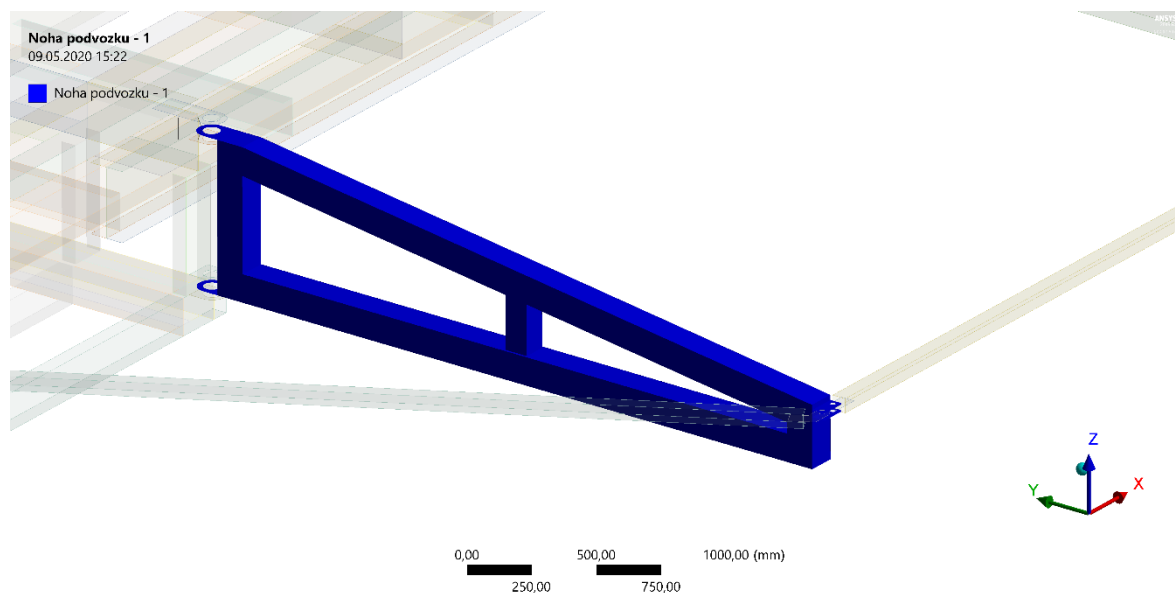
Podvozek jako jedno těleso (svařenec) je složeno z 252 prvků, i zde byly automaticky vygenerovány kontakty. (viz. Obr. 6.2.3.1).



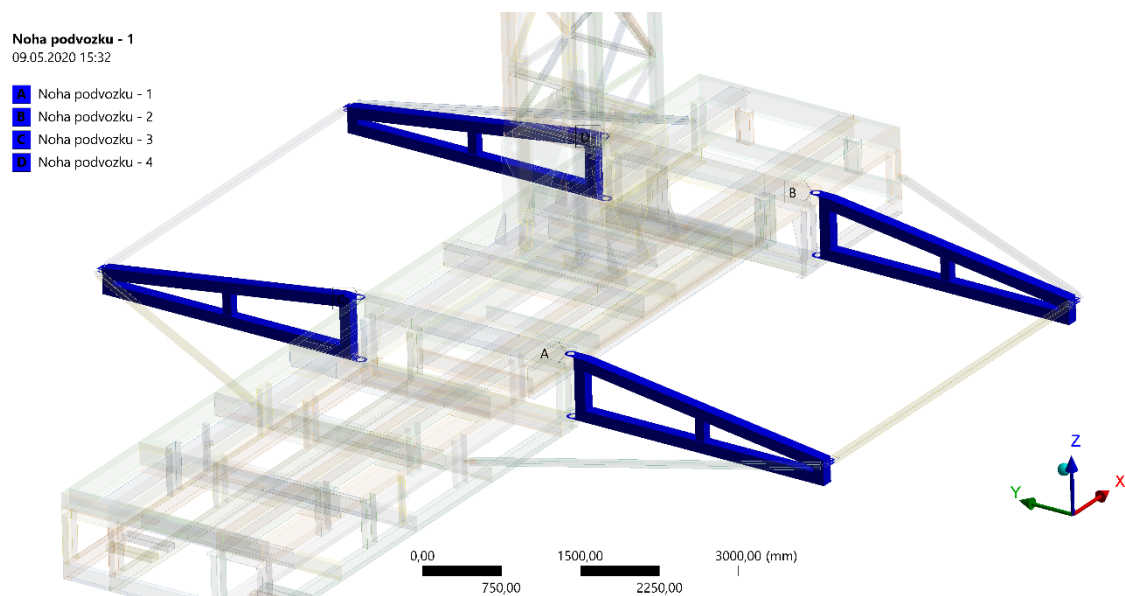
Obr. 6.2.3.1 – Svařenec podvozků

Nohy a rám návěsu

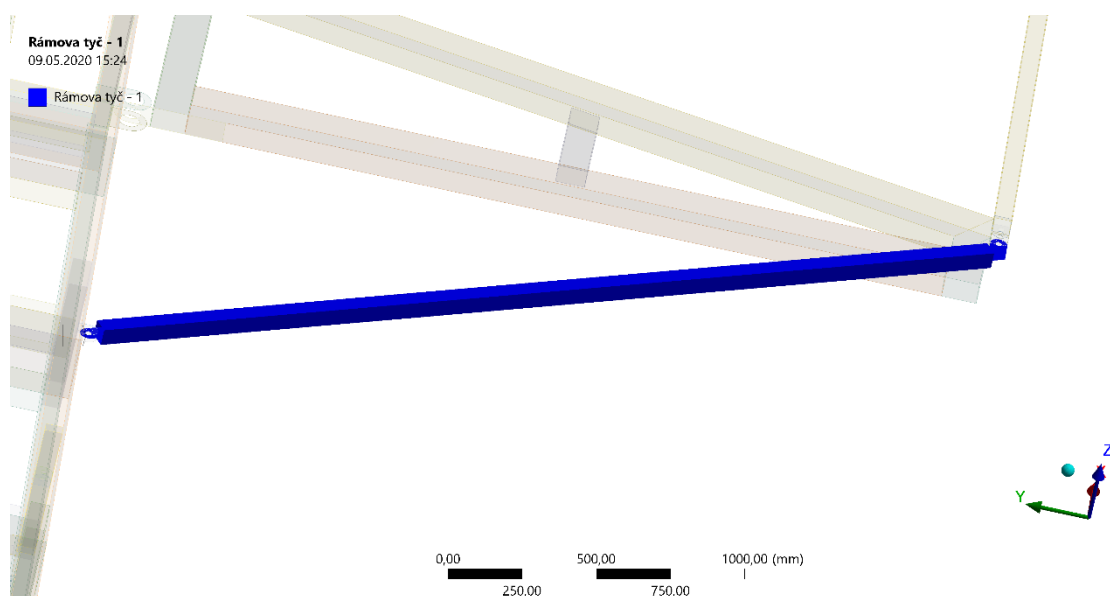
Noha návěsu je svařenec složený z 10-ti prvků (viz. Obr. 6.2.3.2 a Obr. 6.2.3.3). Rám je složen ze 3 prvků (viz. Obr. 6.2.3.4 a Obr. 6.2.3.5).



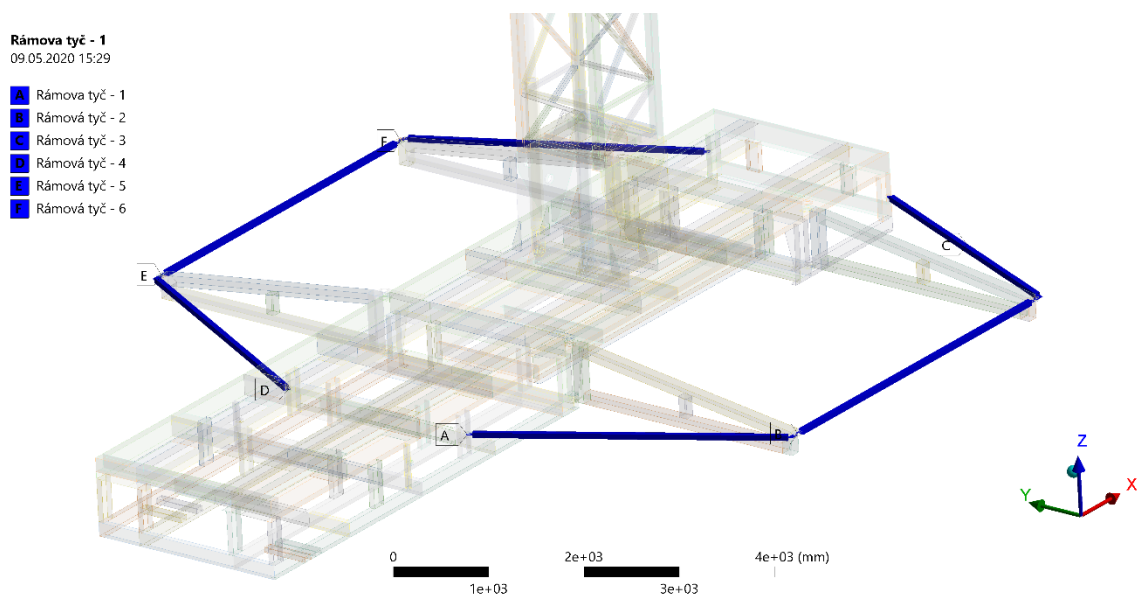
Obr. 6.2.3.2 – Svařenec nohy návěsu



Obr. 6.2.3.3 – Nohy okolo návěsu



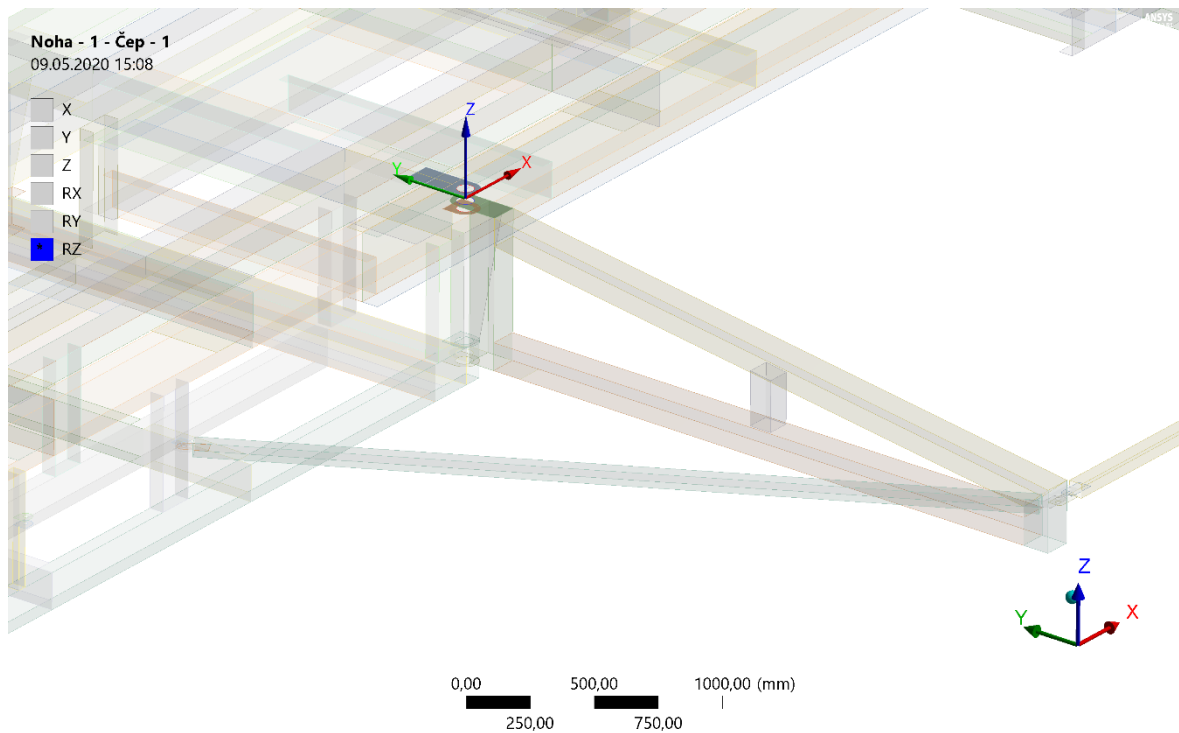
Obr. 6.2.3.4 – Svařenec tyče rámu spojující návěs a nohu



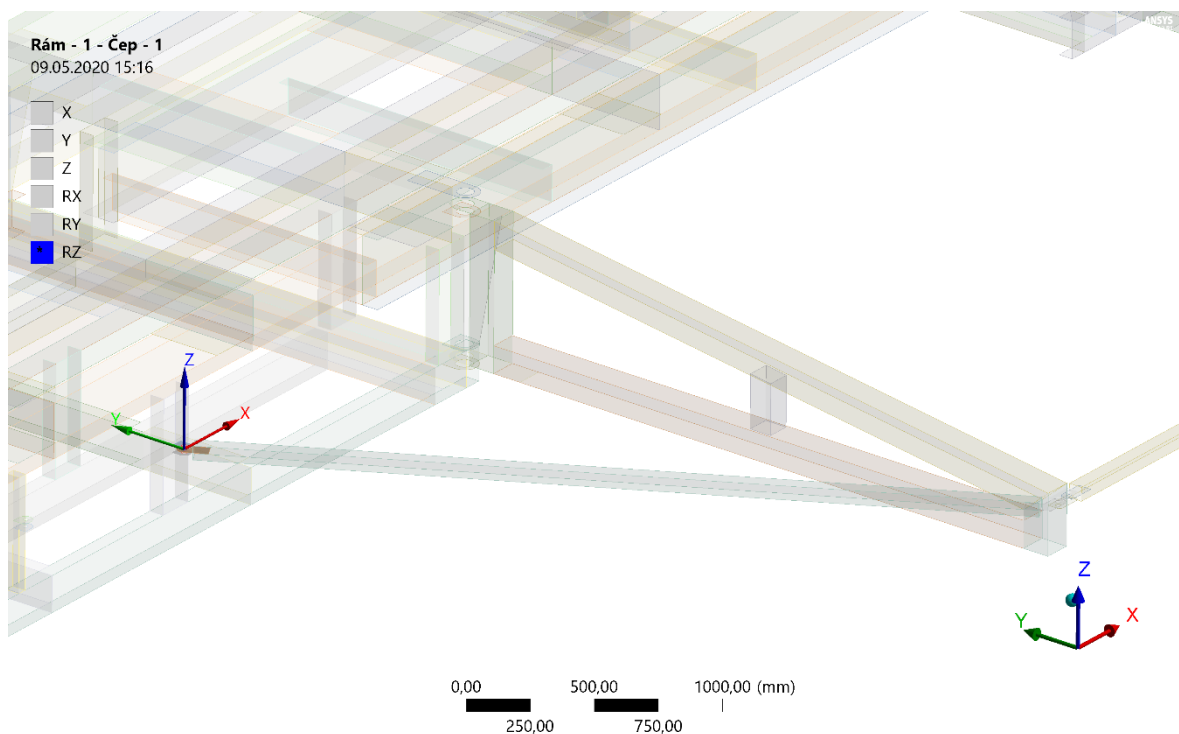
Obr. 6.2.3.5 – Rám okolo návěsu

6.2.3.2 VAZEBNÍ SPOJENÍ NÁVĚSU

Nohy jsou spojeny pomocí čepů k návěsu (viz. Obr. 6.2.3.6). Rám pro lepší stabilitu je připevněn k nohám a k návěsu čepy (viz. Obr. 6.2.3.7).



Obr. 6.2.3.6 – Noha návěsu s rotací okolo vlastní osy Z



Obr. 6.2.3.7 – Rám návěsu s rotací okolo vlastní osy Z

6.3 VYTVOŘENÁ SÍŤ

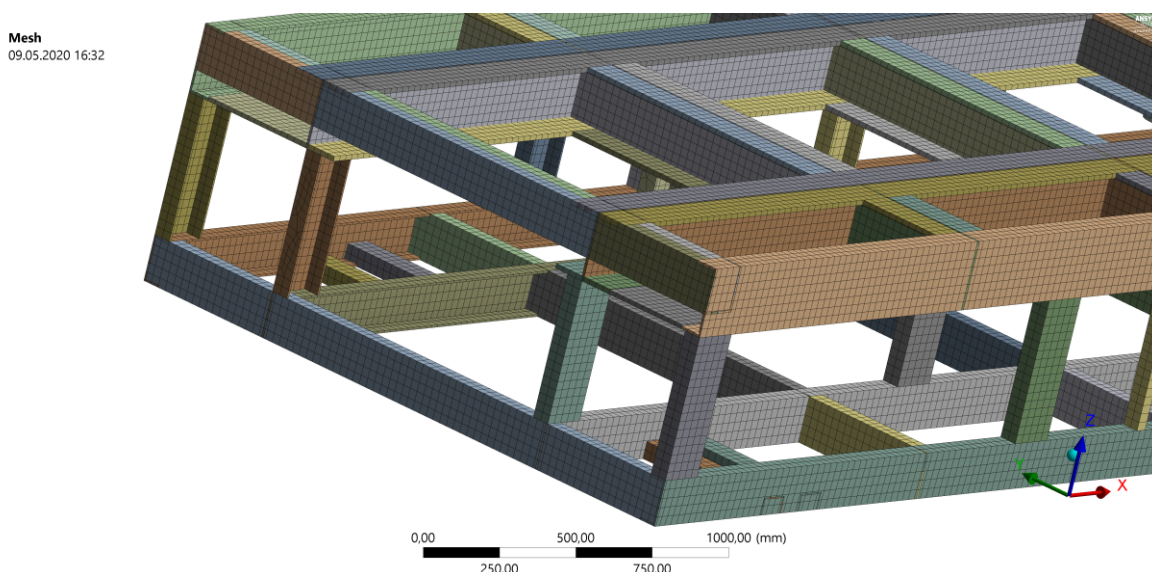
Vytvořená síť modelu obsahuje 235 942 elementů a 259 132 uzlů při velikosti jednoho elementu 30 mm (viz. Obr. 6.3.1). Síť je vytvořena automaticky *SW Mechanical*. Při kontrole, zda je síť v některých místech nesourodá bylo zjištěno, že síť je rovnoměrně rozložená a pravidelná (viz. Obr. 6.3.2).

Normalizované materiály a skořepinové prvky vytváří pravidelnou a hustou síť, bez extrémních úprav. Detail vytvořené sítě lze vidět na Obr. 6.3.3.

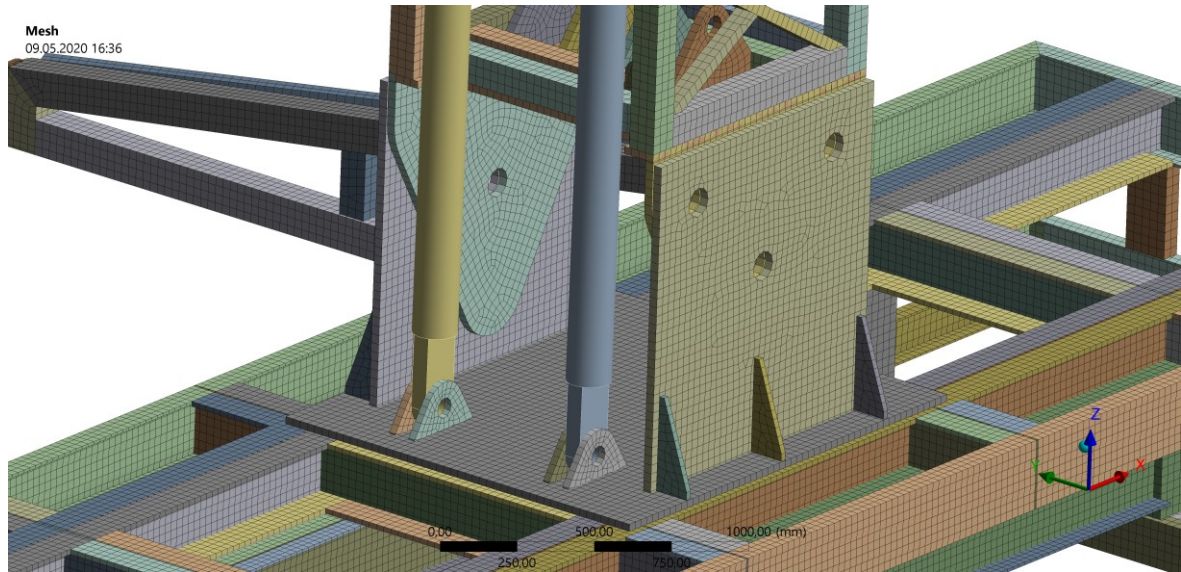
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	30, mm
[+] Sizing	
[+] Quality	
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	259132
<input type="checkbox"/> Elements	235942

Obr. 6.3.1 – Specifikace sítě

Při použití 3D prvků by byl počet elementů a uzlů mnohonásobně vyšší, což by ovlivnilo výpočetní čas a náročnost řešení analýzy.



Obr. 6.3.2 – Rozložení sítě



Obr. 6.3.3 – Detail na vytvořenou síť

Některá tělesa nemají vygenerovanou síť z důvodu, že jsou tato tělesa uvažována jako absolutně tuhá.

6.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Celkem jsou analyzovány 4 stavy zatížení. Pro každý stav byly zavedeny specifické okrajové podmínky.

Tyto 4 zkoumané stavy upravuje norma ČSN EN 13814 tak, že kdyby nastaly tyto zátěžné kritické stavy, konstrukce musí být i nadále bezpečná.

Typy 4 zátěžných stavů:

- ❖ Plné zatížení s působícím větrem ve směru osy Y
- ❖ Plné zatížení s působícím větrem ve směru osy X
- ❖ Nesymetrické (1/4) zatížení s působícím větrem ve směru osy Y
- ❖ Nesymetrické (1/4) zatížení s působícím větrem ve směru osy X

Veškerá definovaná zatížení od větru vychází z normy ČSN EN 1991-1-4.

6.4.1 PLNÉ ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍM VĚTREM VE SMĚRU OSY Y

6.4.1.1 ZATÍŽENÍ OD LIDÍ NA KONSTRUKCI KORUNY

Tíhová síla působící na rameno koruny

Podle normy ČSN EN 13814 je atrakce plně zatížená, tzn. že všechny sedačky na atrakci jsou obsazené.

Tíha jednoho člověka s bezpečností podle kap. 2 činí:

$$F_{Q_1} = \gamma_Q \cdot Q_k = 1,35 \cdot 750 = 1012,5 \text{ N} \quad . \quad (6.4.1)$$

Výsledná tíha jedné sedačky s bezpečností podle kap. 2 činí:

$$F_{GS_1} = \gamma_G \cdot G_k = 1,35 \cdot 140 = 189 \text{ N} \quad . \quad (6.4.2)$$

Celkové zatížení na jedno rameno koruny činí:

$$F_{CR_1} = 2 \cdot F_{Q_1} + F_{GS_1} = 2 \cdot 1012,5 + 189 = 2214 \text{ N} \quad . \quad (6.4.3)$$

Tíha od jednoho člověka se započítává 2 x z důvodu, že do jedné sedačky se vlezou dva lidé. Na Obr. 6.4.1 lze vidět zavedení plného zatížení od lidí na konstrukci koruny.

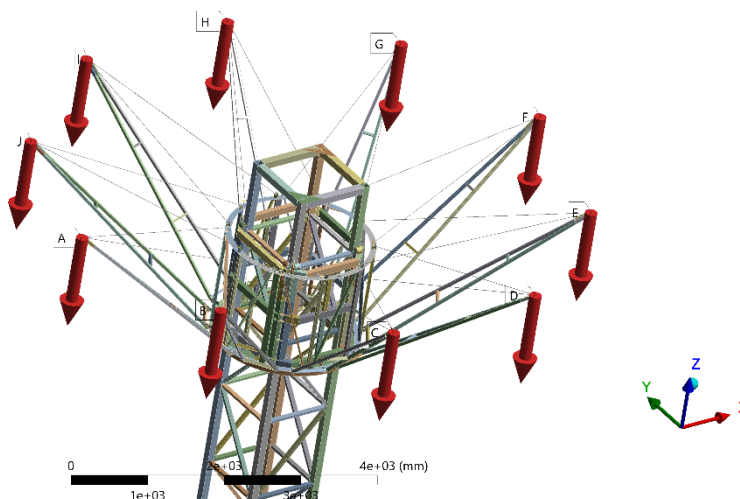
E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Zatížení od lidí na rameno_1

Time: 1, s

09.05.2020 16:14

- A** Zatížení od lidí na rameno_1: 2214, N
- B** Zatížení od lidí na rameno_2: 2214, N
- C** Zatížení od lidí na rameno_3: 2214, N
- D** Zatížení od lidí na rameno_4: 2214, N
- E** Zatížení od lidí na rameno_5: 2214, N
- F** Zatížení od lidí na rameno_6: 2214, N
- G** Zatížení od lidí na rameno_7: 2214, N
- H** Zatížení od lidí na rameno_8: 2214, N
- I** Zatížení od lidí na rameno_9: 2214, N
- J** Zatížení od lidí na rameno_10: 2214, N

**Obr. 6.4.1 – Zavedení plného zatížení od lidí****6.4.1.2 ODSŤŘEDIVÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA RAMENO KORUNY**

Při provozu se koruna otáčí maximálně 12-ti otáčkami za minutu, při otáčení vzniká odstředivá síla. Na ramena koruny působí síla formou výslednice sil tíhové a odstředivé.

Odstředivá síla na jedno rameno se vyjádří podle vzorce 6.4.4

$$F_{od} = m \cdot r \cdot \omega^2 = 221,4 \cdot 5,67 \cdot 1,2566^2 = 1982,3 \text{ N} \quad , \quad (6.4.4)$$

kde:

m ... hmotnost plně obsazené sedačky jednoho ramene,

ω ... úhlová rychlost rotující koruny podle vztahu 6.4.5,

r ... vzdálenost tělesa od osy rotace podle vztahu 6.4.6.

Úhlová rychlost se vyjádří z maximálních otáček podle vzorce 6.4.5

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 12}{30} = 1,2566 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad , \quad (6.4.5)$$

kde:

n ... jsou otáčky za minutu (= 12 ot/min).

Vzdálenost tělesa od osy rotace je dána vztahem 6.4.6

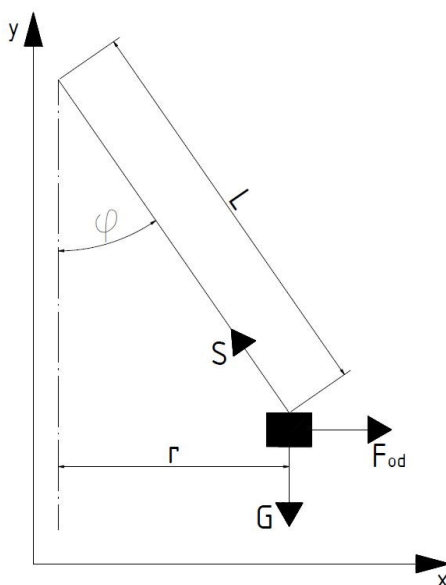
$$r = L \cdot \sin(\varphi_L) = 8,5 \cdot \sin(0,7302) = 5,67 \text{ m} , \quad (6.4.6)$$

kde:

L ... délka lana (= 8,5 m),

φ_L ... úhel mezi osou rotace a lanem vyjádřený vztahem 6.4.9.

Úhel φ_L se vypočte vyřešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých. Rovnice jsou odvozené z Obr. 6.4.2.



Obr. 6.4.2 – Působení odstředivé síly

Z Obr. 6.4.2 jsou odvozené rovnice rovnováhy pro osu x a y

$$X: 0 = -S \cdot \sin(\varphi_L) + F_{od} , \quad (6.4.7)$$

$$Y: 0 = -G + S \cdot \cos(\varphi_L) . \quad (6.4.8)$$

Po úpravě soustavy dvou rovnic vzorců 6.4.4 a 6.4.5 vznikne vztah 6.4.6

$$\varphi_L = \arccos\left(\frac{g}{L \cdot \omega^2}\right) = \arccos\left(\frac{9,81}{8,5 \cdot 1,2566^2}\right) = 0,7302 \text{ rad} \approx 41,84^\circ , \quad (6.4.9)$$

kde:

g ... tíhové zrychlení (= 9,81 m/s²),

ω ... úhlová rychlost rotující koruny podle vztahu 6.4.5,

L ... délka lana (= 8,5 m).

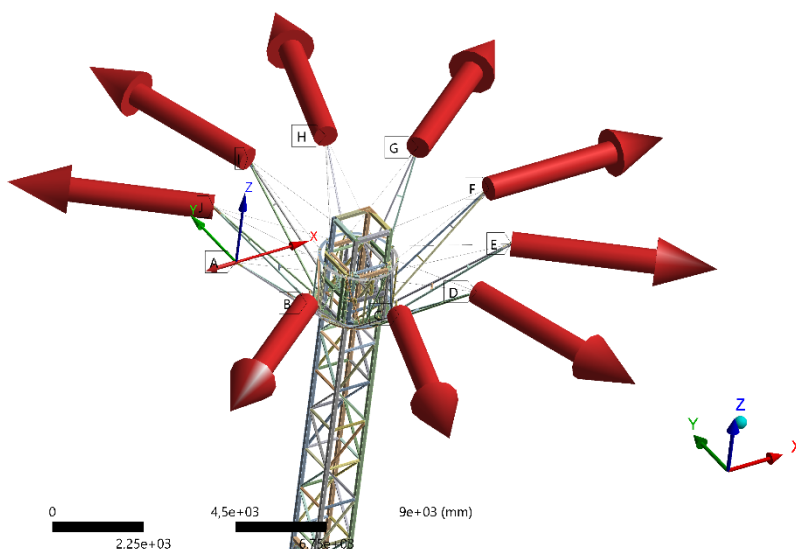
E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Zatížení od odstředivé síly na rameno_1

Time: 1, s

09.05.2020 16:13

- A** Zatížení od odstředivé síly na rameno_1: 1982,3 N
- B** Zatížení od odstředivé síly na rameno_2: 1982,3 N
- C** Zatížení od odstředivé síly na rameno_3: 1982,3 N
- D** Zatížení od odstředivé síly na rameno_4: 1982,3 N
- E** Zatížení od odstředivé síly na rameno_5: 1982,3 N
- F** Zatížení od odstředivé síly na rameno_6: 1982,3 N
- G** Zatížení od odstředivé síly na rameno_7: 1982,3 N
- H** Zatížení od odstředivé síly na rameno_8: 1982,3 N
- I** Zatížení od odstředivé síly na rameno_9: 1982,3 N
- J** Zatížení od odstředivé síly na rameno_10: 1982,3 N

**Obr. 6.4.3 – Zavedení odstředivé síly na ramena koruny**

Z Obr. 6.4.3 je vidět vliv odstředivé síly od plného zatížení.

6.4.1.3 ZATÍŽENÍ OD KLADKOSTROJE NA ATRAKCI

Celková tíha koruny se přenáší pomocí dvou lan přes kladkostroj do věže atrakce, jak bylo popsáno v kap. 4 kladkostrojový mechanismus.

Celková tíha koruny je odvozena vztahem 6.4.10

$$F_{CK} = F_{CR_{10}} + G_{KA} = 22140 + 17800 = 39940 \text{ N} \quad , \quad (6.4.10)$$

kde:

$F_{CR_{10}}$... tíha 10-ti zatížených ramen viz. vztah 6.4.11,

G_{KA} ... tíha koruny atrakce podle vztahu 6.4.13.

Celková tíha všech deseti ramen $F_{CR_{10}}$ je odvozena podle vztahu 6.4.11

$$F_{CR_{10}} = F_{CR_1} \cdot n = 2214 \cdot 10 = 22140 \text{ N} \quad , \quad (6.4.11)$$

kde:

F_{CR_1} ... tíha jednoho zatíženého ramene viz. vzorec 6.4.3,

n ... počet ramen (=10).

Tíha koruny podléhá stejné bezpečnosti definované podle normy ČSN EN 13814. Pro zavedení bezpečnosti 1,35 na konstrukci se koruně zvýší hustota podle vztahu 2.3

$$\rho_B = \rho \cdot 1,35 = 7800 \cdot 1,35 = 10530 \text{ kg/m}^3, \quad (6.4.12)$$

kde:

ρ ... hustota oceli S355JO.

Mechanica ve složce geometrie automaticky vypočetl váhu koruny konstrukce, která činí podle vztahu 6.4.13:

$$G_{KA} = 1779,9 \text{ kg} \approx \mathbf{17800 \text{ N}}. \quad (6.4.13)$$

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	10530	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Mod...		
8	Young's Modulus	2,1E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,75E+11	Pa	
11	Shear Modulus	8,0769E+10	Pa	

Obr. 6.4.4 – Změna hustoty

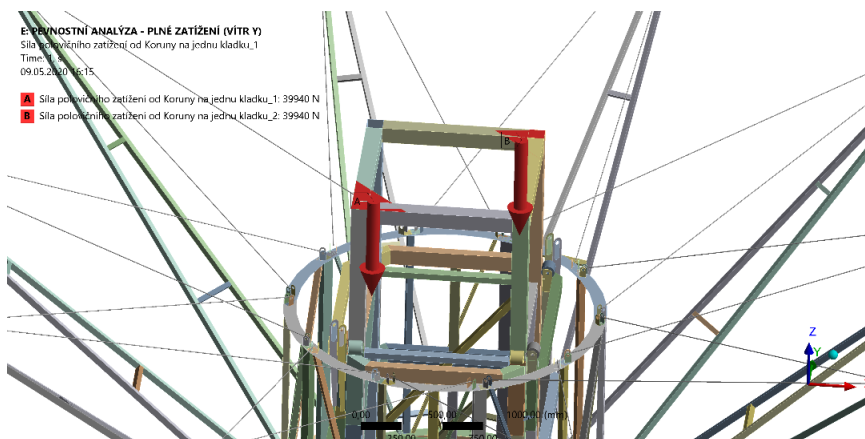
Tíha přenášená v laně G se odvodí pomocí 6.4.14.

$$G = \frac{F_{CK}}{2} = \frac{39940}{2} = 19970 \text{ N}, \quad (6.4.14)$$

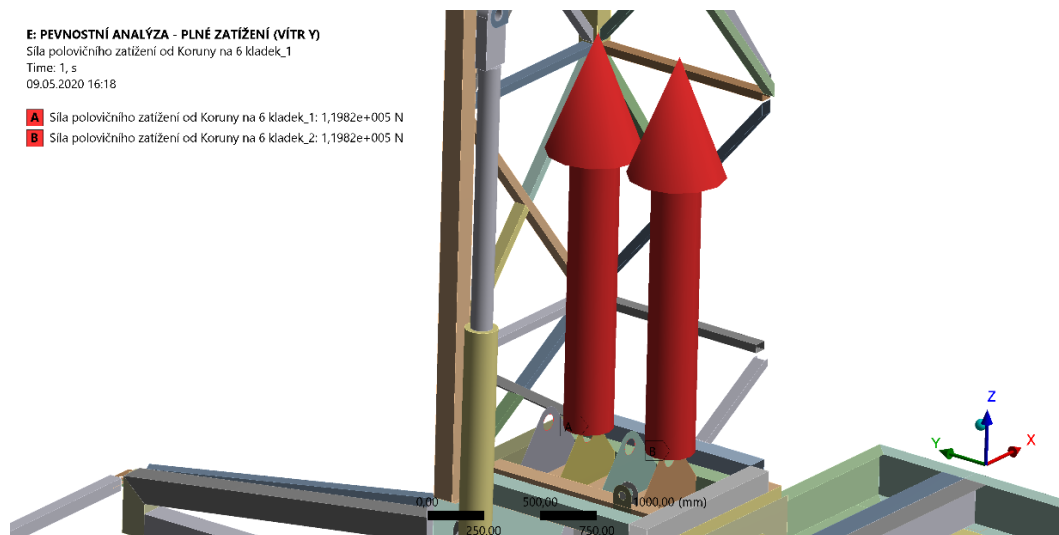
kde:

F_{CK} ... celková tíha od koruny atrakce viz. vztah 6.4.10.

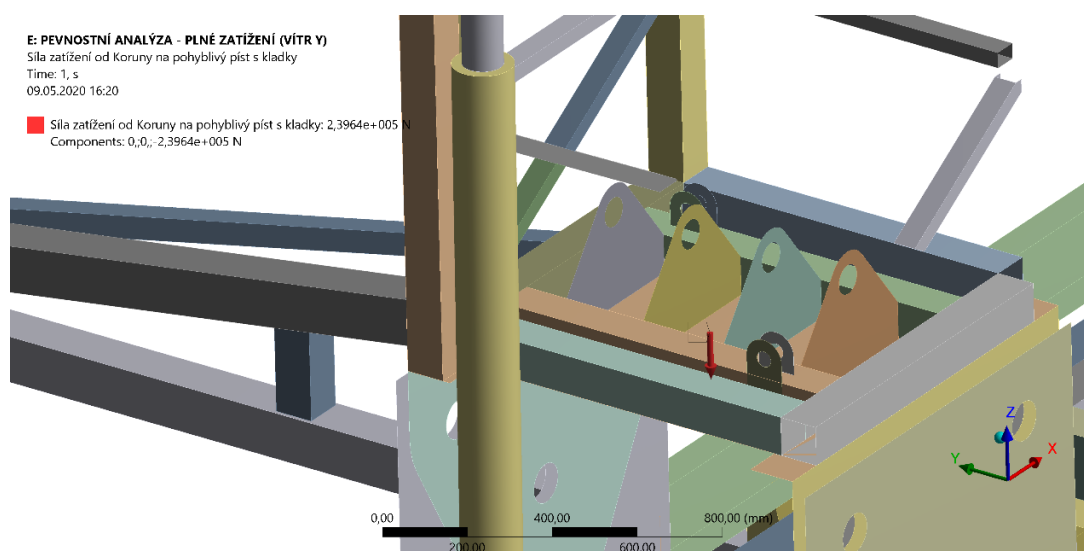
Veškeré odvozené působení na konstrukci od kladek je vysvětleno v kap. 4 kladkostrojový mechanismus.



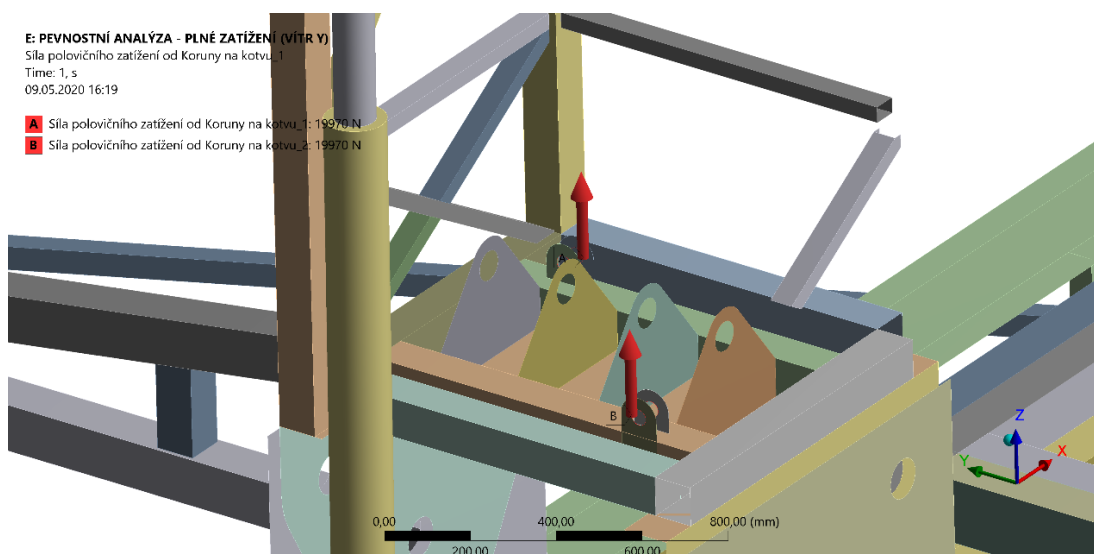
Obr. 6.4.5 – Zatížení od pevných kladek do konstrukce



Obr. 6.4.6 – Zatížení od pevných kladek na čepy kladkostroje (6-krát zatížená od tíhy G)



Obr. 6.4.7 – Zatížení od pístu s vozíkem (12-krát zatížení od tíhy G)



Obr. 6.4.8 – Zatížení od upevnění lan ke konstrukci (na každé straně od tíhy G)

6.4.1.4 ZATÍŽENÍ VĚTREM NA KONSTRUKCI

Postup pro řešení zatížení větrem je uveden v kap. 3.

Podle Obr. 3.1 Mapa větrných oblastí na území ČR, byla stanovena oblast III s přiřazenou hodnotou základní rychlosti větru $v_{b,0}=27,5 \text{ m/s}$.

Zvolená kategorie terénu podle Tab. 3.1 je oblast III. Pro oblast III jsou parametry $z_0 = 0,3 \text{ m}$ a $z_{min} = 5 \text{ m}$. Výška věže je $z_1 = 23 \text{ m}$ a koruny atrakce $z_2 = 25 \text{ m}$.

Stanovení základní rychlosti větru V_b podle vztahu 3.1.1

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 27,5 = 27,5 \text{ m/s} \quad . \quad (6.4.15)$$

Stanovení střední rychlosti větru pro věž $V_m(Z_1)$ podle vztahu 3.2.1

$$V_m(Z_1) = C_r(Z_1) \cdot C_o(Z) \cdot V_b = 0,935 \cdot 1 \cdot 27,5 = 25,7 \text{ m/s} \quad . \quad (6.4.16)$$

Stanovení součinitele drsnosti $C_r(Z_1)$ pro věž podle vztahu 3.2.1.1

$$C_r(Z_1) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) = 0,2154 \cdot \ln\left(\frac{23}{0,3}\right) = 0,935 \quad . \quad (6.4.17)$$

Stanovení součinitele terénu k_r pro věž a korunu atrakce podle vztahu 3.2.2.1

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05}\right)^{0,07} = 0,2154 \quad . \quad (6.4.18)$$

Stanovení turbulence větru $I_v(Z_1)$ podle vztahu 3.3.2

$$I_v(Z_1) = \frac{\sigma_v}{V_m(Z_1)} = \frac{k_I}{C_o(Z) \cdot \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{23}{0,3}\right)} = 0,23 \quad . \quad (6.4.19)$$

Stanovení střední rychlosti větru pro korunu $V_m(Z_2)$ podle vztahu 3.2.1

$$V_m(Z_2) = C_r(Z_2) \cdot C_o(Z) \cdot V_b = 0,935 \cdot 1 \cdot 27,5 = 26,2 \text{ m/s} \quad . \quad (6.4.20)$$

Stanovení součinitele drsnosti $C_r(Z_2)$ pro korunu podle vztahu 3.2.1.1

$$C_r(Z_2) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) = 0,2154 \cdot \ln\left(\frac{25}{0,3}\right) = 0,9527 \quad . \quad (6.4.20)$$

Stanovení turbulence větru $I_v(Z_2)$ podle vztahu 3.3.2

$$I_v(Z_2) = \frac{\sigma_v}{V_m(Z_2)} = \frac{k_I}{C_o(Z) \cdot \ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{25}{0,3}\right)} = 0,226 \quad . \quad (6.4.21)$$

Stanovení maximálního dynamického tlaku $q_p(Z_1)$ pro výšku **23 m** podle vztahu 3.4.1

$$q_p(Z_{e1}) = [1 + 7 \cdot I_v(Z_1)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(Z_1) = [1 + 7 \cdot 0,23] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25,7^2 = 1080 \text{ Pa} \quad (6.4.22)$$

Stanovení maximálního dynamického tlaku $q_p(Z_2)$ pro výšku **25 m** podle vztahu 3.4.1

$$q_p(Z_{e2}) = [1 + 7 \cdot I_v(Z_2)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(Z_2) = [1 + 7 \cdot 0,226] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 26,2^2 = 1108 \text{ Pa} \quad (6.4.23)$$

Stanovení síly působící na věž atrakce podle vztahu 3.5.4

$$F_{w1} = C_{f1} \cdot q_p(Z_{e1}) \cdot A_{ref1} = 2,45 \cdot 1080 \cdot 6,016 = \mathbf{15920 \text{ N}} \quad (6.4.24)$$

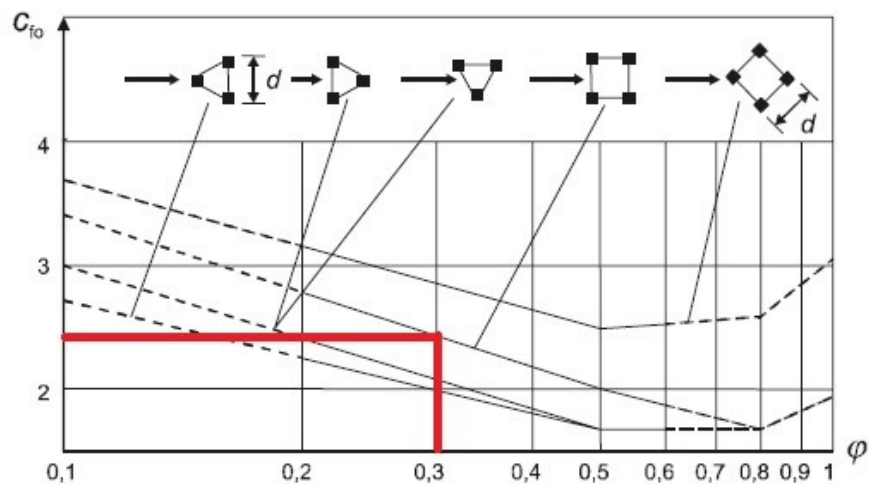
Stanovení síly působící na korunu atrakce podle vztahu 3.5.4

$$F_{w2} = C_{f2} \cdot q_p(Z_{e2}) \cdot A_{ref2} = 1,9 \cdot 1108 \cdot 1,82 = \mathbf{3832} \quad (6.4.25)$$

Stanovení součinitele síly pro konstrukci věže podle vztahu 3.6.1

$$C_{f1} = 2,5 \cdot 0,98 = 2,45 \quad (6.4.26)$$

Určení součinitele síly pro věž bez účinkujících konců z Obr. 6.4.9.



Obr. 6.4.9 – Odečtení hodnoty součinitele síly pro věž

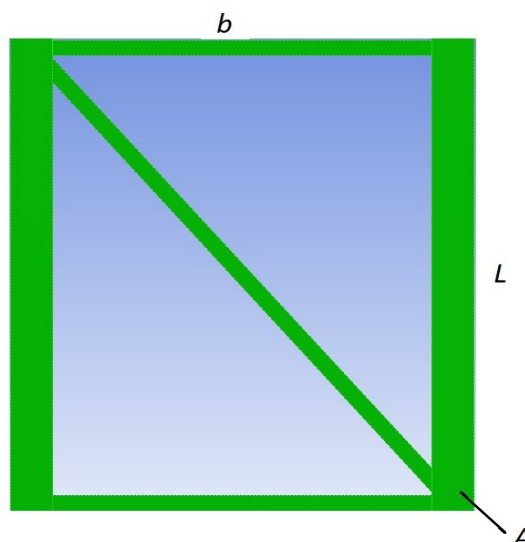
Z Obr. 6.4.9 součinitele síly pro věž se odečetla hodnota $c_{f,0} = 2,5$.

Stanovení součinitele plnosti věže podle 3.6.1.1

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{376240}{1364000} = 0,2758 \approx 0,3 \quad (6.4.27)$$

$$A_c = l \cdot b = 1100 \cdot 1240 = 1364000 \text{ mm}^2 \quad (6.4.28)$$

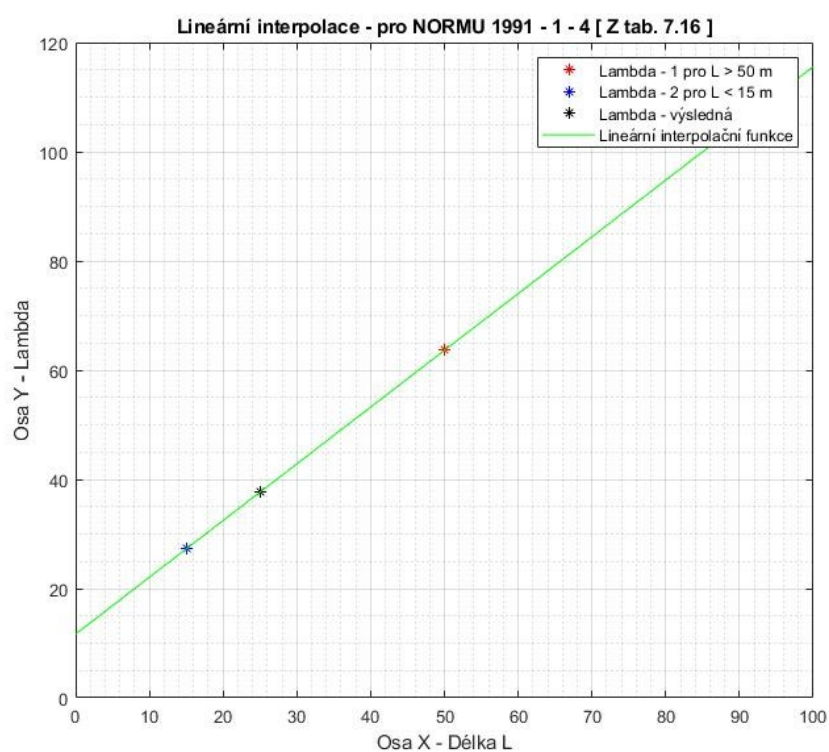
$$A = 376240 \text{ mm}^2 \quad (6.4.29)$$



Obr. 6.4.10 – Jeden blok věže konstrukce

Plocha A byla změřena v *DesignModeleru*. Poměr plnosti byl zaokrouhlen na celá čísla.

Stanovení efektivní štíhlosti a součinitele konců podle kap. 3.6.2.

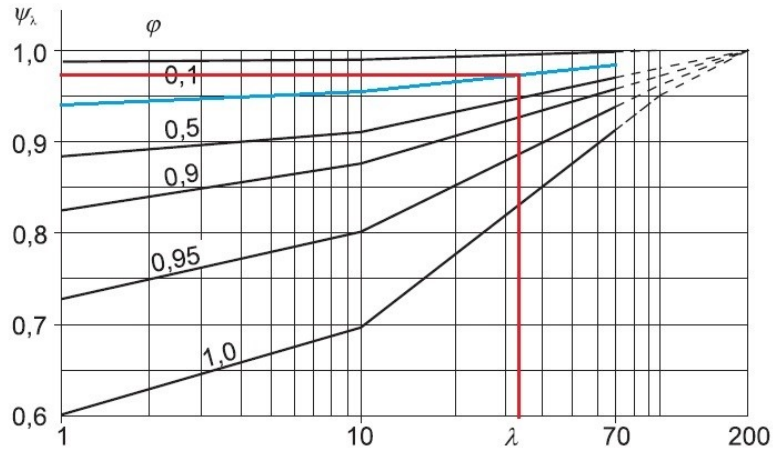


Obr. 6.4.11 – Lineární interpolace

Určení efektivní štíhlosti z Tab. 3.2 pomocí lineární interpolace proběhlo v programu *MATLAB R2019a* (viz. Obr. 6.4.11). Odpovídající hodnota činí $\lambda = 37,66 \approx 38$. Tato hodnota platí pro věž i korunu atrakce.

Stanovení součinitele účinků konců věže podle kap. 3.6.2.

Do Obr. 3.4 byla vytvořena hodnota poměrné plnosti a pomocí efektivní štíhlosti byl odečten součinitel účinků konců pro věž. Z Obr. 6.4.12 je odečtena hodnota $\psi_\lambda = 0,98$.

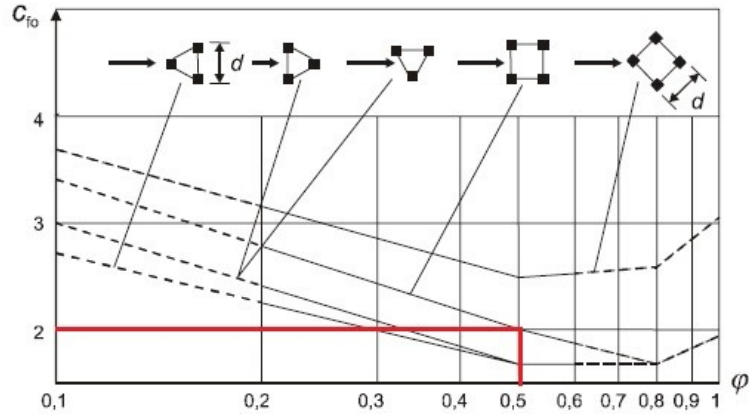


Obr. 6.4.12 – Určení orientační hodnoty součinitele účinků konců pro věž

Stanovení součinitele síly pro korunu atrakce podle vztahu 3.6.1

$$C_{f2} = 2 \cdot 0,95 = 1,9 \quad . \quad (6.4.30)$$

Určení součinitele síly pro korunu bez účinkujících konců z Obr. 6.4.13.



Obr. 6.4.13 – Odečtení hodnoty součinitele síly pro korunu

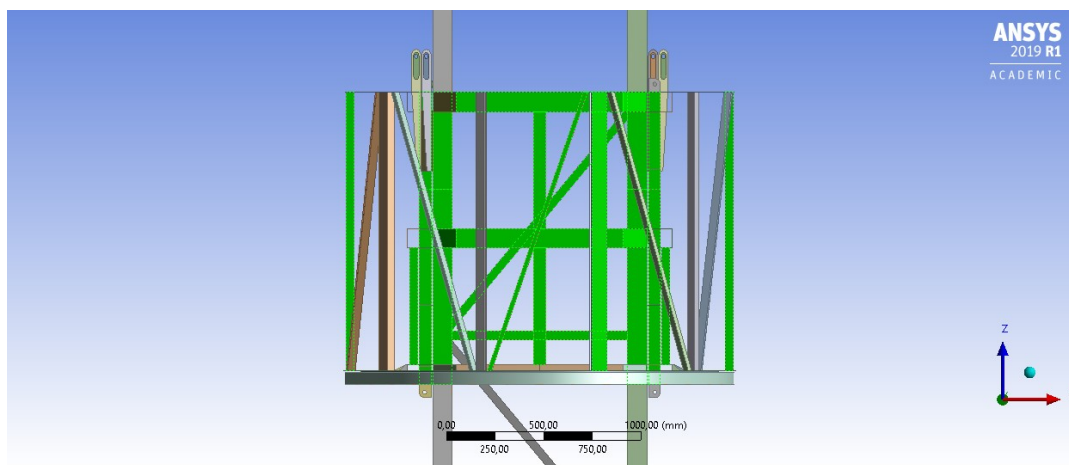
Z Obr. 6.4.13 byla odečtena hodnota $c_{f0} = 2$.

Stanovení součinitele plnosti koruny atrakce podle vztahu 3.6.1.1

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{1820000}{4296000} = 0,424 \approx 0,5 \quad , \quad (6.4.31)$$

$$A_c = l \cdot b = 2864 \cdot 1500 = 4296000 \text{ mm}^2 \quad , \quad (6.4.32)$$

$$A = 1820000 \text{ mm}^2 \quad . \quad (6.4.33)$$

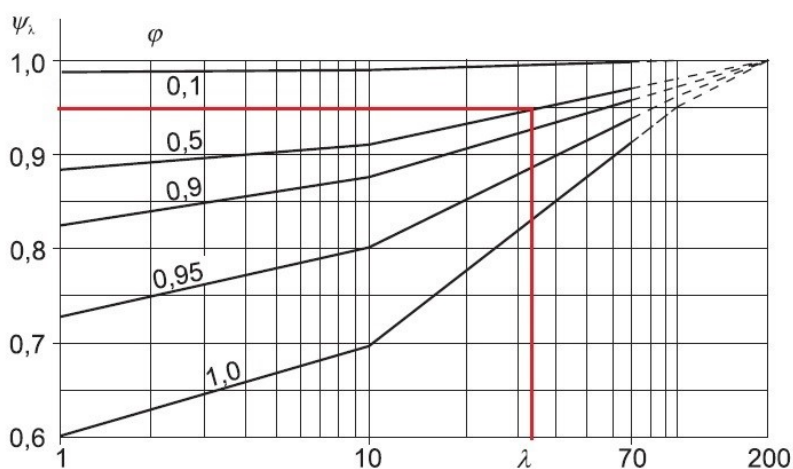


Obr. 6.4.14 – Plocha koruny atrakce

Plocha A byla změřena v *DesignModeleru*. Poměr plnosti byl zaokrouhlen na celá čísla. Plochu zatížené koruny od větru lze vidět na Obr. 6.4.14.

Stanovení součinitele účinků konců koruny atrakce podle kap. 3.6.2.

Do Obr. 3.4 byla vytvořena hodnota poměrné plnosti a pomocí efektivní štíhlosti byl odečten součinitel účinků konců pro věž. Z Obr. 6.4.15 byla odečtena hodnota $\psi_\lambda = 0,95$.



Obr. 6.4.15 – Určení orientační hodnoty součinitele účinků konců pro korunu atrakce

Jak bylo řečeno v kap. 3 zatížení větrem, určení referenční plochy je rovno ploše, na kterou působí síly od větru.

Pro věž A_{ref1} je roven 16-ti blokům A, počítané u vztahu 6.4.29

$$A_{ref1} = 16 \cdot 0,376240 = 6,016 \text{ m}^2 \quad . \quad (6.4.34)$$

Pro korunu atrakce A_{ref2} je roven obsahu A, počítané u vztahu 6.4.33

$$A_{ref2} = A = 1,82 \text{ m}^2 \quad . \quad (6.4.35)$$

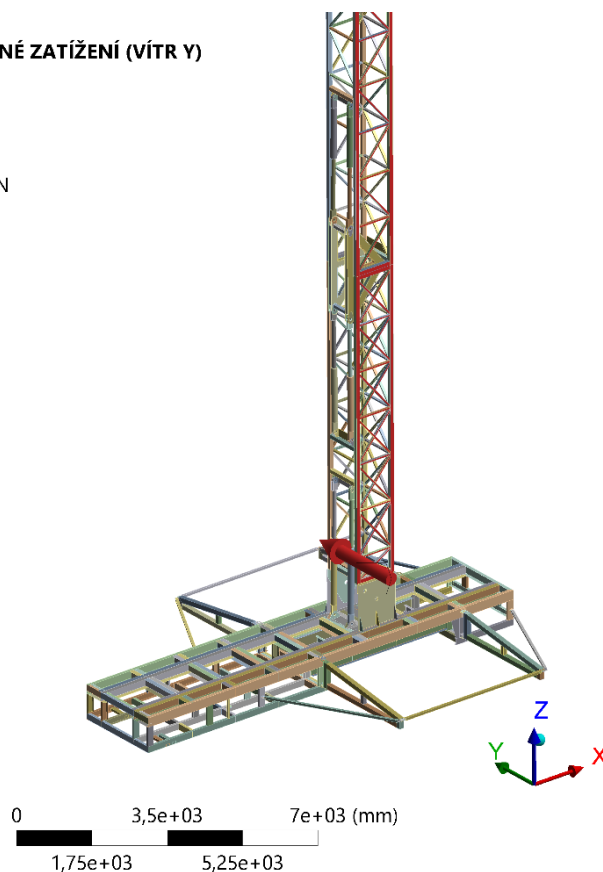
E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Síla od větru na věž

Time: 1, s

12.05.2020 16:47

■ Síla od větru na věž: 15920 N
Components: 0,;15920;0, N



Obr. 6.4.16 – Zavedení síly od větru na konstrukci věže ve směru osy Y

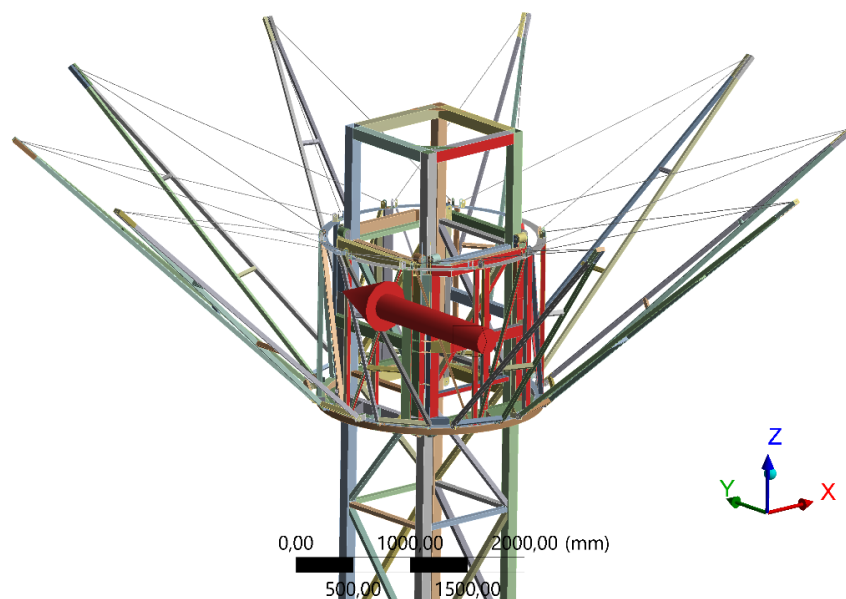
E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Síla od větru na korunu

Time: 1, s

12.05.2020 16:48

■ Síla od větru na korunu : 3832, N
Components: 0,;3832,;0, N



Obr. 6.4.17 – Zavedení síly od větru na korunu atrakce ve směru osy Y

6.4.1.5 ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE OD VLASTNÍ TÍHY

E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Gravitace_(Standard Earth Gravity)

Time: 1, s

09.05.2020 16:24

Gravitace_(Standard Earth Gravity): 9806,6 mm/s²
Components: 0,0,-9806,6 mm/s²



Obr. 6.4.18 – Zavedení gravitační tíhy na konstrukci

6.4.1.6 ZAVEDENÍ PODPORY KONSTRUKCE (FIXED SUPPORT)

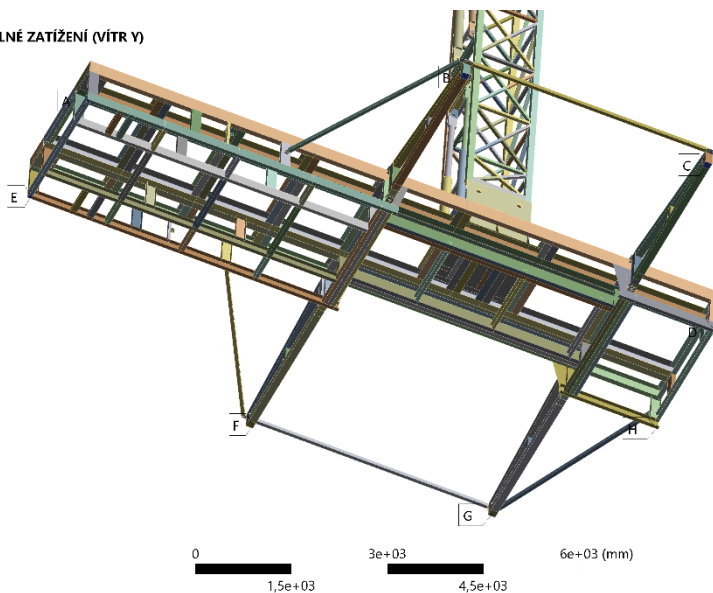
E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Podpora-1

Time: 1, s

09.05.2020 16:11

- A** Podpora-1
- B** Podpora-2
- C** Podpora-3
- D** Podpora-4
- E** Podpora-5
- F** Podpora-6
- G** Podpora-7
- H** Podpora-8



Obr. 6.4.19 – Zavedení podpor

E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

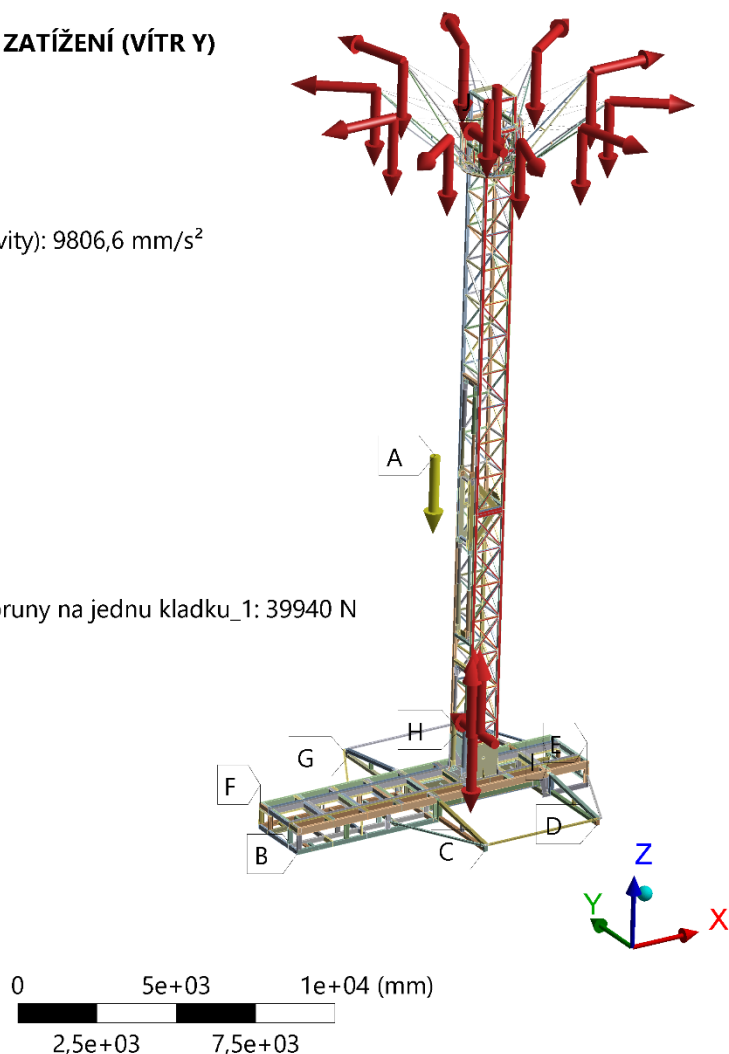
Static Structural

Time: 1, s

Items: 10 of 38 indicated

12.05.2020 12:43

- A** Gravitace_(Standard Earth Gravity): 9806,6 mm/s²
- B** Podpora-1
- C** Podpora-2
- D** Podpora-3
- E** Podpora-4
- F** Podpora-5
- G** Podpora-6
- H** Podpora-7
- I** Podpora-8
- J** Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_1: 39940 N



Obr. 6.4.20 – Zobrazení všech okrajových podmínek pro plné zatížení s větrem ve směru osy

6.4.2 PLNÉ ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍM VĚTREM VE SMĚRU OSY X

Plné zatížení s působícím větrem ve směru osy X má identické zatěžovací hodnoty jako plné zatížení s působícím větrem ve směru osy Y. Rozdíl je ve směru působení sil od větru.

Pro tento případ se pouze v *SW Mechanical* změní orientace působení sil větru a zbytek okrajových podmínek se v modelu zachová.

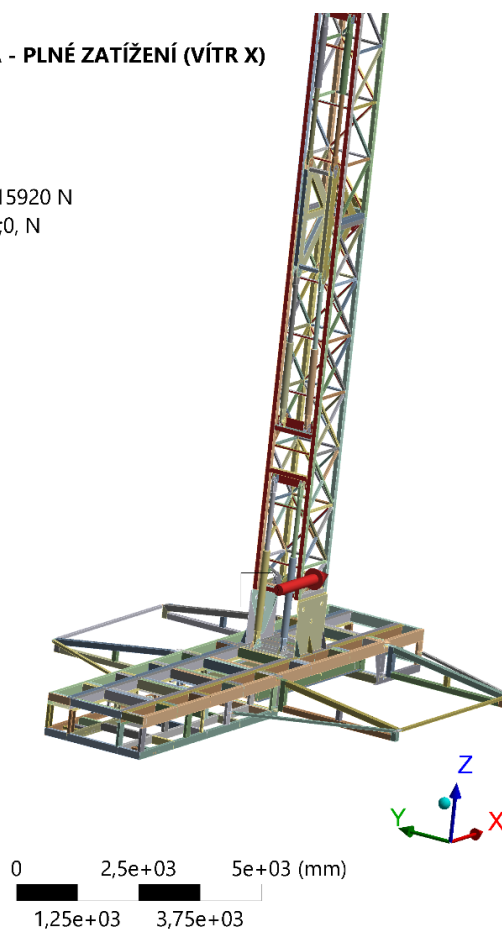
G: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)

Síla od větru na věž 2

Time: 1, s

12.05.2020 12:56

■ Síla od větru na věž 2: 15920 N
Components: 15920;0;0, N



Obr. 6.4.21 – Zavedení síly od větru na konstrukci věže ve směru osy X

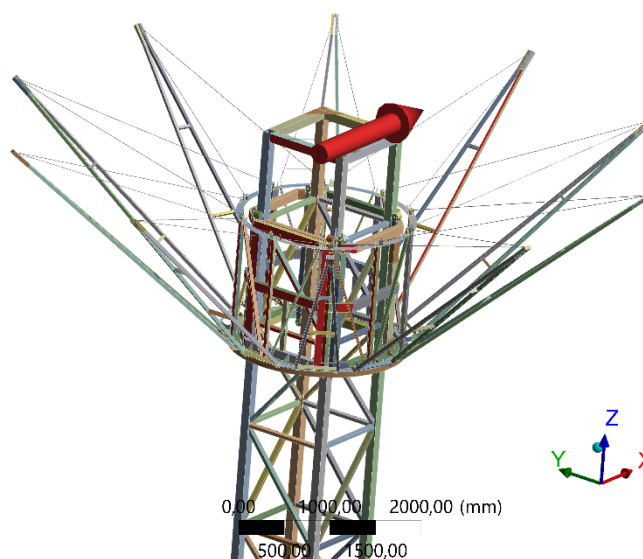
G: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)

Síla od větru na korunu 2

Time: 1, s

12.05.2020 12:58

■ Síla od větru na korunu 2: 3832, N
Components: 3832;0;0, N



Obr. 6.4.22 – Zavedení síly od větru na korunu atrakce ve směru osy X

G: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)

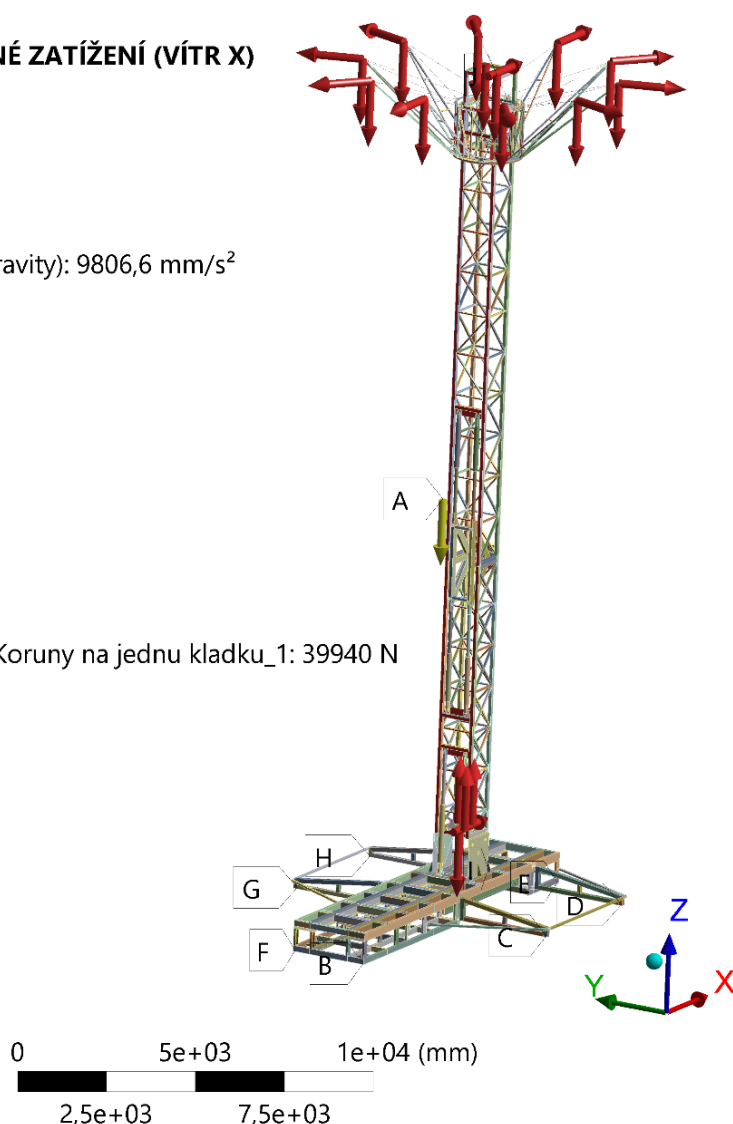
Static Structural

Time: 1, s

Items: 10 of 38 indicated

12.05.2020 12:54

- A** Gravitace_(Standard Earth Gravity): 9806,6 mm/s²
- B** Podpora-1
- C** Podpora-2
- D** Podpora-3
- E** Podpora-4
- F** Podpora-5
- G** Podpora-6
- H** Podpora-7
- I** Podpora-8
- J** Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_1: 39940 N



Obr. 6.4.23 – Zobrazení všech okrajových podmínek pro plné zatížení s větrem ve směru osy X

6.4.3 NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍ SÍLOU OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y

6.4.3.1 ZATÍŽENÍ OD LIDÍ NA KONSTRUKCI KORUNY

Tíhová síla působící na rameno koruny

Podle normy ČSN EN 13814 je atrakce nesymetricky (1/4) zatížena, tzn. že tři sedačky na atrakci jsou obsazené a sedm sedaček je prázdných.

Tíha od lidí a sedaček je vypočtena ve vztazích 6.4.2 a 6.4.3 u plného zatížení.

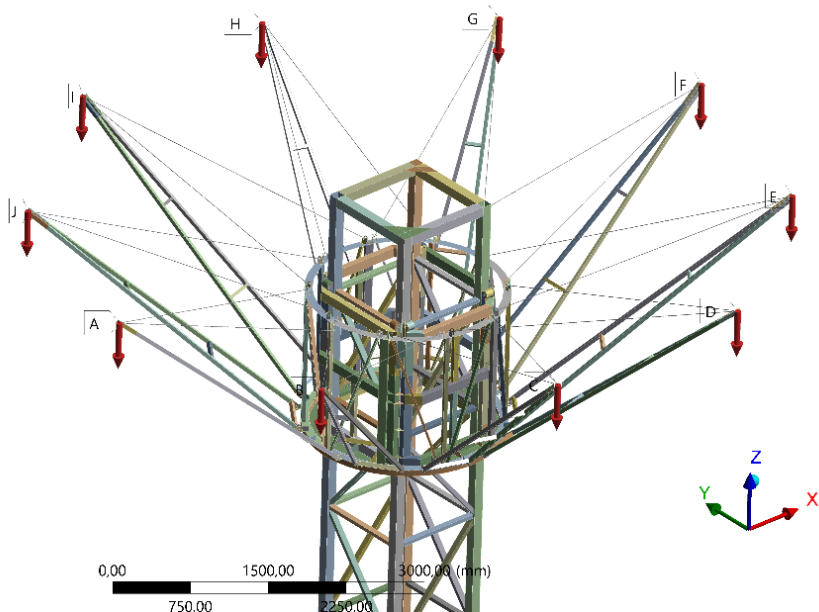
H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 / 4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Zatížení od lidí na rameno_1

Time: 1, s

12.05.2020 14:09

- A** Zatížení od lidí na rameno_1: 189, N
- B** Zatížení od lidí na rameno_2: 189, N
- C** Zatížení od lidí na rameno_3: 189, N
- D** Zatížení od lidí na rameno_4: 189, N
- E** Zatížení od lidí na rameno_5: 189, N
- F** Zatížení od lidí na rameno_6: 189, N
- G** Zatížení od lidí na rameno_7: 189, N
- H** Zatížení od lidí na rameno_8: 2214, N
- I** Zatížení od lidí na rameno_9: 2214, N
- J** Zatížení od lidí na rameno_10: 2214, N

**Obr. 6.4.24 – Zavedení nesymetrického zatížení ve směru osy Y**

Na Obr. 6.4.24 lze vidět zavedení 1/4 nesymetrického zatížení lidmi po směru osy Y. Zbylé zatížení je pouze od prázdných sedaček.

6.4.3.2 ODSŤŘEDIVÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA RAMENO KORUNY

Odstředivá síla způsobená od lidí se sedačkami byla vypočítána v kap. 6.4.1.2. Při nesymetrickém stavu vlastní tíha od sedaček působí jinou odstředivou silou. Na ramena koruny působí síla od sedačky formou výslednice sil tíhové a odstředivé.

Odstředivá síla od prázdné sedačky na jedno rameno se vyjádří podle vzorce 6.4.39

$$F_{od} = m \cdot r \cdot \omega^2 = 18,9 \cdot 5,67 \cdot 1,2566^2 = 169,22 \text{ N} \quad , \quad (6.4.39)$$

kde:

m ... hmotnost prázdné sedačky jednoho ramene (=18,9 kg),

ω ... úhlová rychlost rotující koruny podle vztahu 6.4.5,

r ... vzdálenost tělesa od osy rotace podle vztahu 6.4.6.

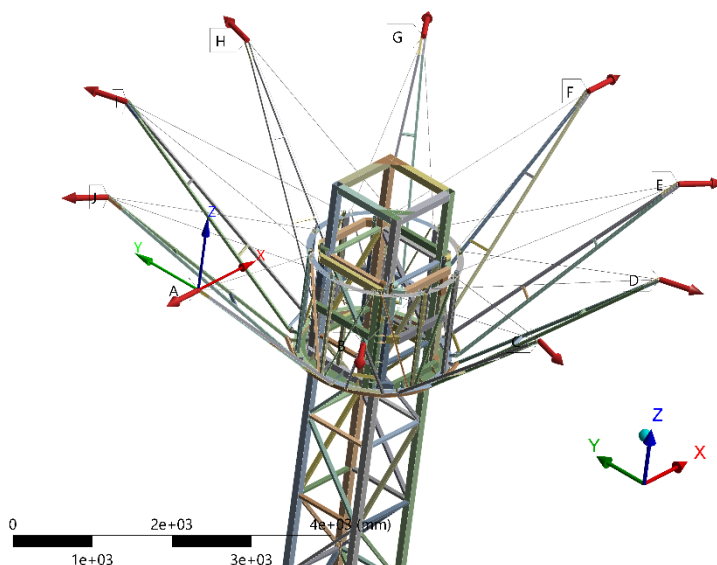
H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Zatížení od odstředivé síly na rameno_1

Time: 1, s

12.05.2020 14:12

- A** Zatížení od odstředivé síly na rameno_1: 169,22 N
- B** Zatížení od odstředivé síly na rameno_2: 169,22 N
- C** Zatížení od odstředivé síly na rameno_3: 169,22 N
- D** Zatížení od odstředivé síly na rameno_4: 169,22 N
- E** Zatížení od odstředivé síly na rameno_5: 169,22 N
- F** Zatížení od odstředivé síly na rameno_6: 169,22 N
- G** Zatížení od odstředivé síly na rameno_7: 169,22 N
- H** Zatížení od odstředivé síly na rameno_8: 1982,3 N
- I** Zatížení od odstředivé síly na rameno_9: 1982,3 N
- J** Zatížení od odstředivé síly na rameno_10: 1982,3 N

**Obr. 6.4.25 – Zavedení odstředivé síly na ramena koruny**

Z Obr. 6.4.25 lze vidět zavedení 1/4 nesymetrického odstředivého zatížení lidmi po směru osy Y. Na zbylé ramena koruny působí slabší odstředivá síla od sedaček.

6.4.3.3 ZATÍŽENÍ OD KLDKOSTROJE NA ATRAKCI

Celková tíha koruny je odvozena vztahem 6.4.40

$$F_{CK1/4} = F_{CR_3} + G_{KA} = 7965 + 17800 = 25765 \text{ N} \quad , \quad (6.4.40)$$

kde:

F_{CR_3} ... tíha 3 zatížených a 7 nezatížených ramen podle vztahu 6.4.41,

G_{KA} ... tíha koruny atrakce 6.4.13.

Celková tíha všech deseti ramen je vypočtena podle vztahu 6.4.41

$$F_{CR_3} = F_{CR_1} \cdot n_o + F_{GS_1} \cdot n_n = 2214 \cdot 3 + 189 \cdot 7 = 7965 \text{ N} \quad , \quad (6.4.41)$$

kde:

F_{CR_1} ... tíha jednoho zatíženého ramene 6.4.38,

n_o ... počet obsazených sedaček (=3),

n_n ... počet neobsazených sedaček (=7).

Tíha přenášena v laně G se odvodí vztahem 6.4.42

$$G_{1/4} = \frac{F_{CK1/4}}{2} = \frac{25765}{2} = 12882,5 \text{ N} \quad , \quad (6.4.42)$$

kde:

$F_{CK1/4}$... celková tíha koruny atrakce při nesymetrii podle vztahu 6.4.40.

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

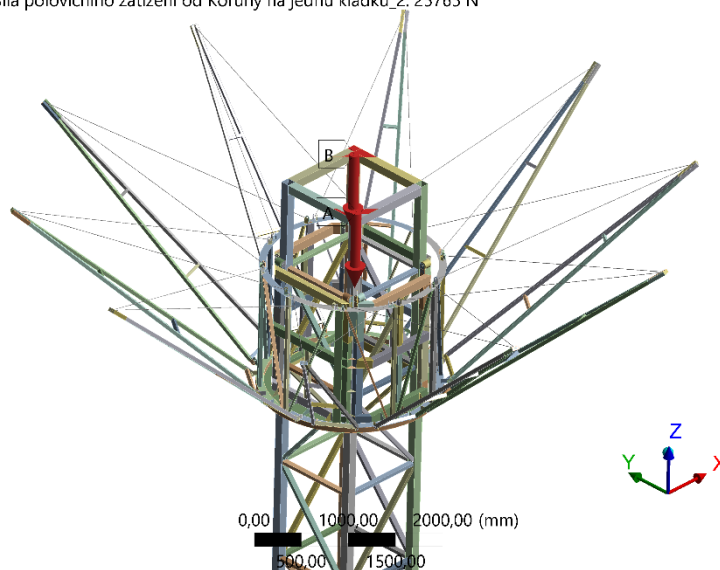
Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_1

Time: 1, s

12.05.2020 20:00

A Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_1: 25765 N

B Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_2: 25765 N



Obr. 6.4.26 – Zatížení od pevných kladek do konstrukce (2-krát zatížená od tíhy $G_{1/4}$)

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

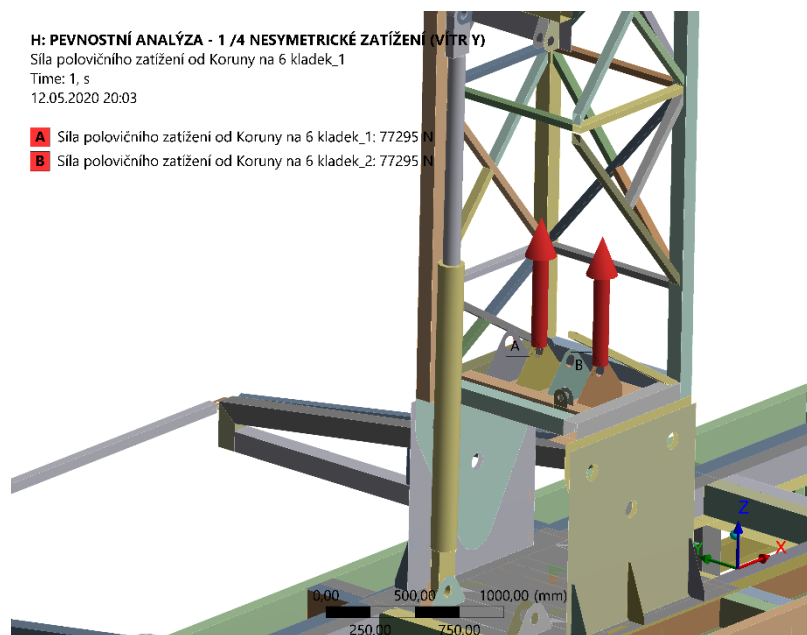
Síla polovičního zatížení od Koruny na 6 kladek_1

Time: 1, s

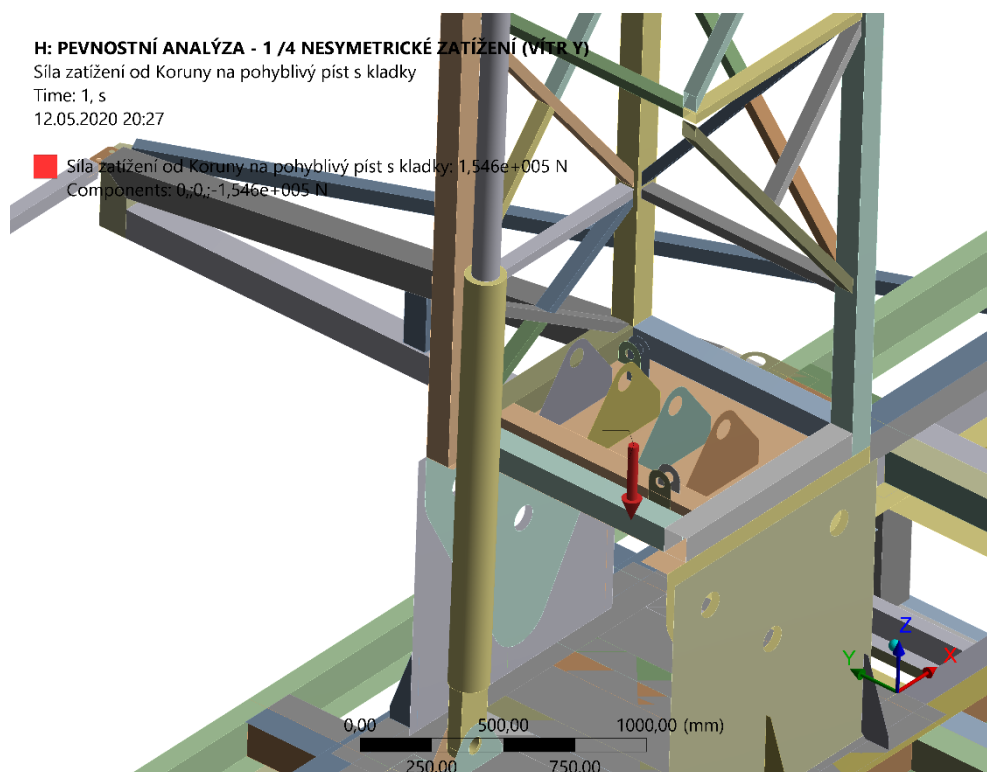
12.05.2020 20:03

A Síla polovičního zatížení od Koruny na 6 kladek_1: 77295 N

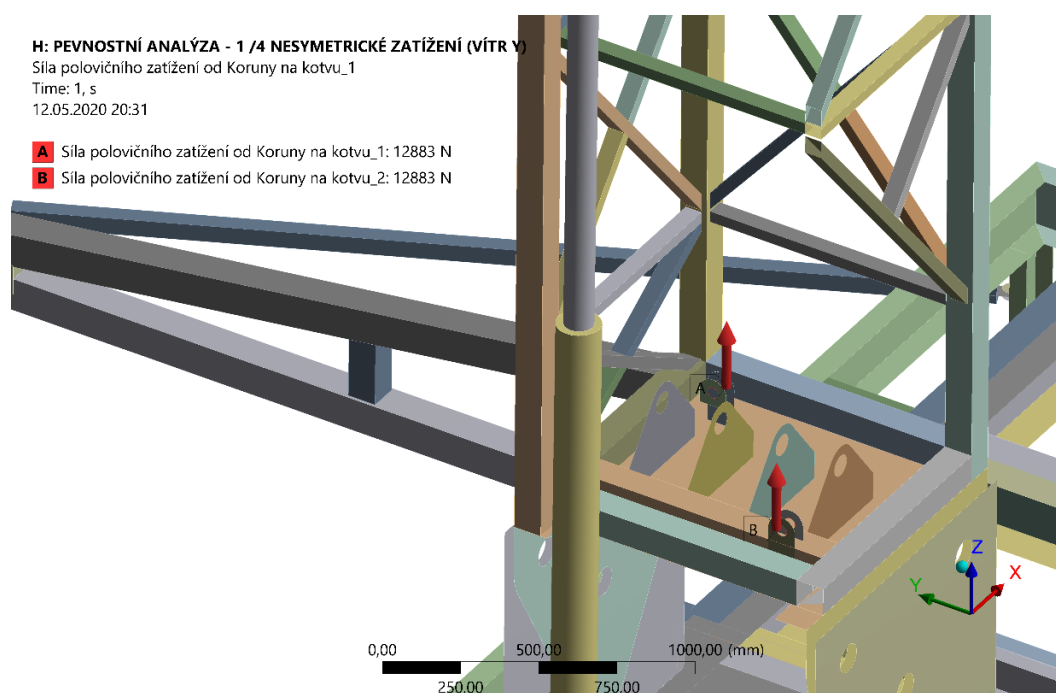
B Síla polovičního zatížení od Koruny na 6 kladek_2: 77295 N



Obr. 6.4.27 – Zatížení od pevných kladek na čepy kladkostroje (6-krát zatížená od tíhy $G_{1/4}$)



Obr. 6.4.28 – Zatížení od pístu s vozíkem (12-krát zatížení od tíhy $G_{1/4}$)



Obr. 6.4.29 – Zatížení od upevnění lan ke konstrukci (na každé straně od tíhy $G_{1/4}$)

6.4.3.4 ZATÍŽENÍ VĚTREM NA KONSTRUKCI

Zatížení větrem na konstrukci je popsáno v kap. 2 a vypočteno v kap. 6.4.1.4. Velikost síly způsobené od větru je stejná jako u předchozí kap. 6.4.1.

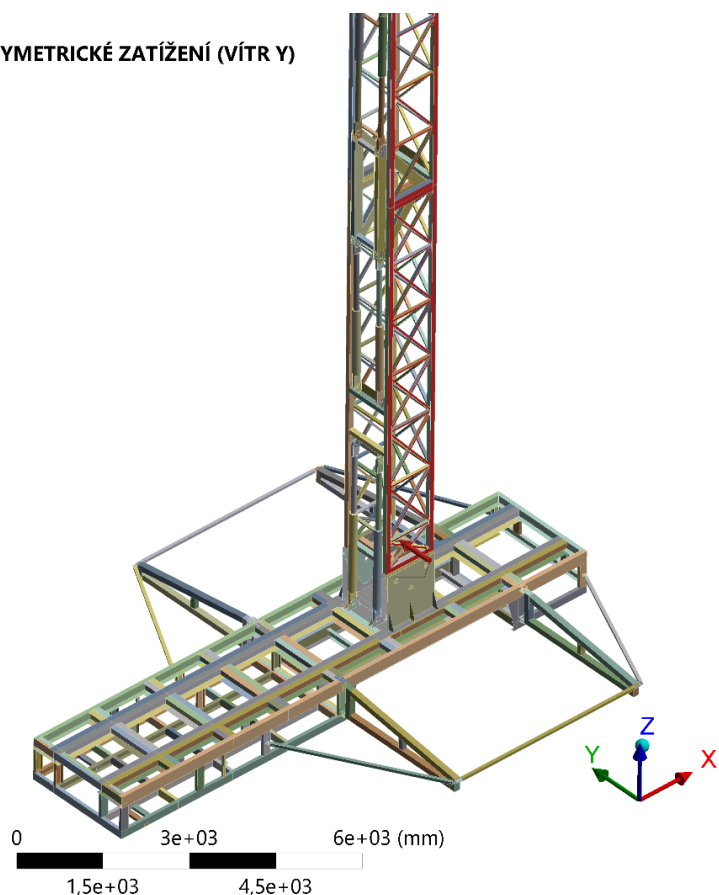
H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 / 4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Síla od větru na věž

Time: 1, s

12.05.2020 16:41

■ Síla od větru na věž: 15920 N
Components: 0,;15920;0, N



Obr. 6.4.30 – Zavedení síly od větru na konstrukci věže ve směru osy Y

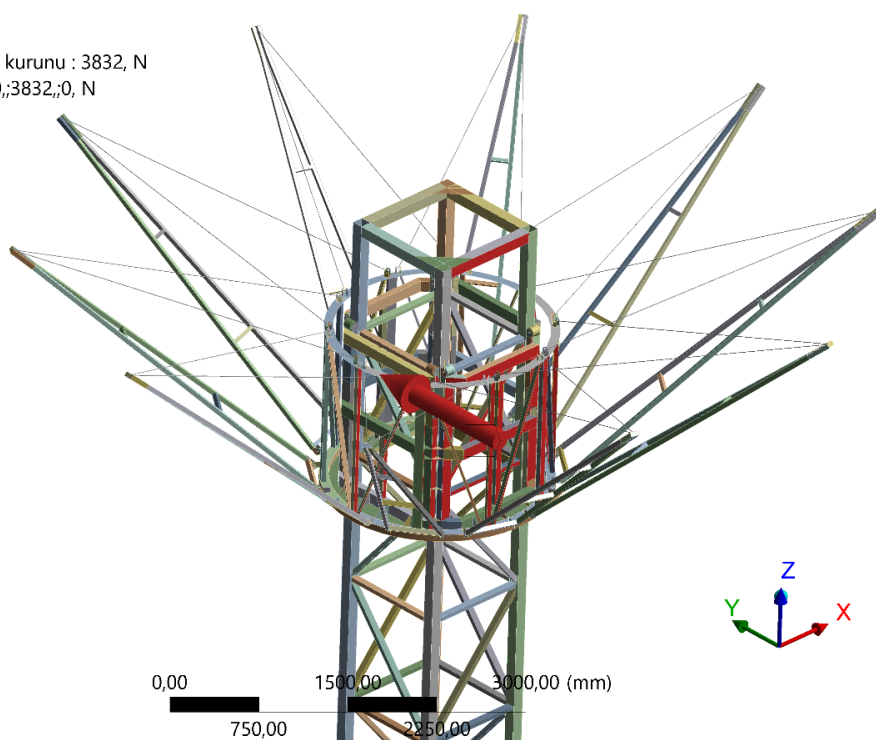
H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 / 4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Síla od větru na korunu

Time: 1, s

12.05.2020 16:43

■ Síla od větru na korunu : 3832, N
Components: 0,;3832,;0, N



Obr. 6.4.31 – Zavedení síly od větru na korunu atrakce ve směru osy Y

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

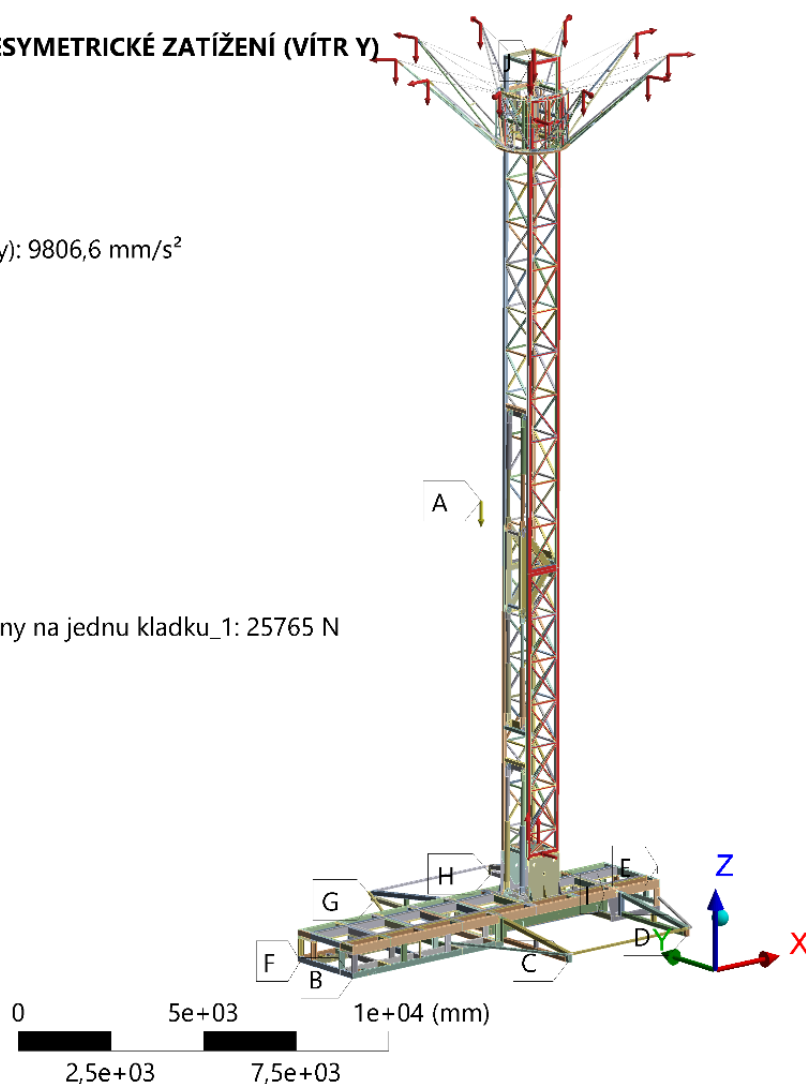
Static Structural

Time: 1, s

Items: 10 of 38 indicated

12.05.2020 20:34

- A** Gravitate_(Standard Earth Gravity): 9806,6 mm/s²
- B** Podpora-1
- C** Podpora-2
- D** Podpora-3
- E** Podpora-4
- F** Podpora-5
- G** Podpora-6
- H** Podpora-7
- I** Podpora-8
- J** Síla polovičního zatížení od Koruny na jednu kladku_1: 25765 N



Obr. 6.4.32 – Zobrazení všech okrajových podmínek pro 1/4 nesymetrického zatížení s větrem ve směru osy Y

6.4.4 NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ S PŮSOBÍCÍ SÍLOU OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X

Nesymetrické (1/4) zatížení s působícím větrem ve směru osy X má identické zatěžovací hodnoty jako plné zatížení s působícím větrem ve směru osy Y. Rozdíl je jen ve směru působení sil od větru.

Pro tento případ se v *SW Mechanical* změní orientace působení sil větru, ostatní okrajové podmínky se v modelu zachovávají.

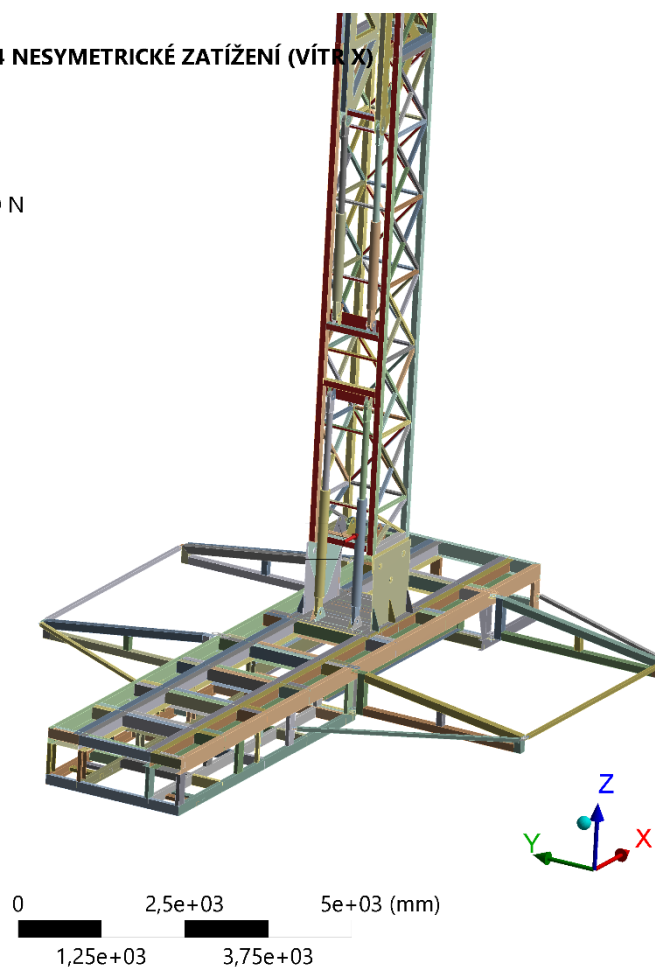
I: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)

Síla od větru na věž 2

Time: 1, s

12.05.2020 17:12

■ Síla od větru na věž 2: 15920 N
Components: 15920;0;0, N



Obr. 6.4.33 – Zavedení síly od větru na konstrukci věže ve směru osy X

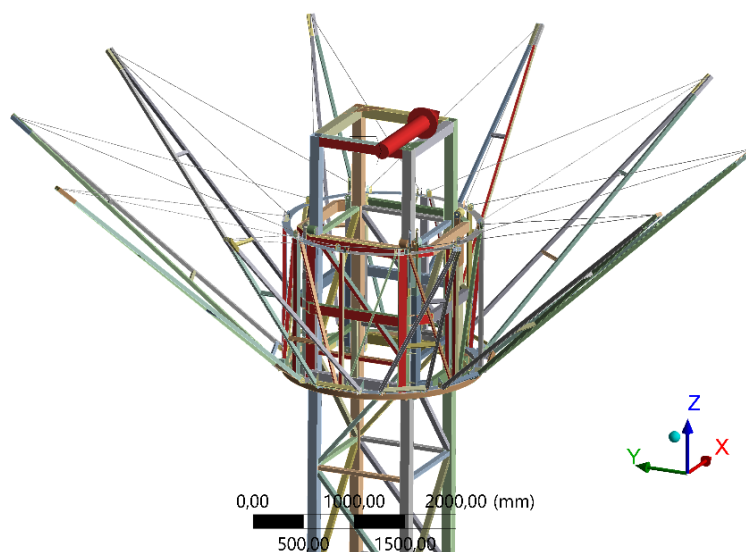
I: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)

Síla od větru na korunu 2

Time: 1, s

12.05.2020 17:31

■ Síla od větru na korunu 2: 3832, N
Components: 3832;0;0, N



Obr. 6.4.34 – Zavedení síly od větru na korunu atrakce ve směru osy X

6.5 VÝSLEDKY PEVNOSTNÍ ANALÝZY

6.5.1 ANALÝZA REAKCÍ A SIL

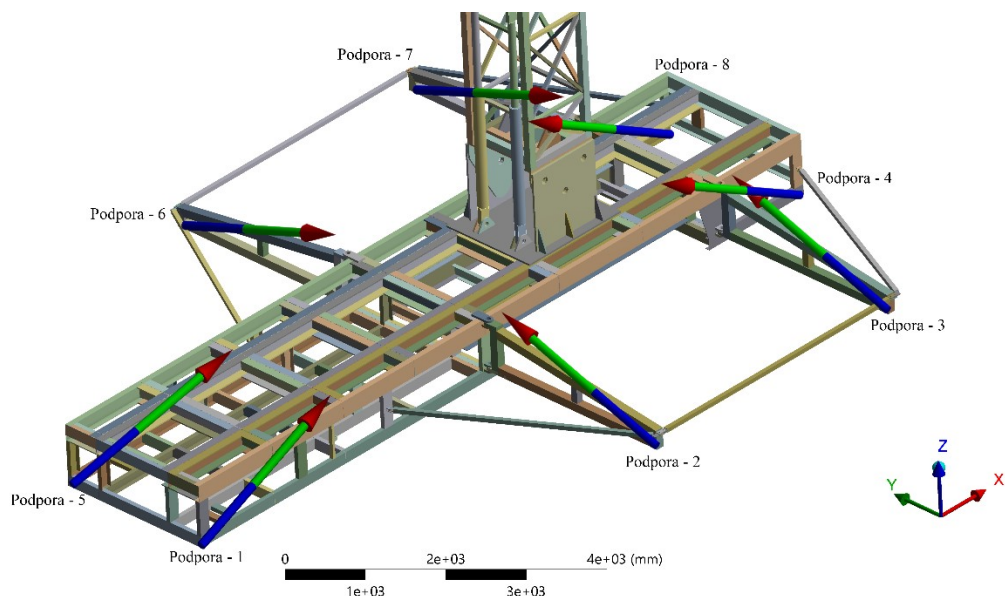
6.5.1.1 REAKCE V PODPORÁCH

Při vyhodnocení pevnostní analýzy je důležité zkontrolovat, zda se konstrukce nepřevrhne při působení definovaných zatížení. Reakce symbolizuje odpor podloží, na kterém atrakce stojí. Ke kontrole byly vyčísleny reakce od podpor na návěsu. Pokud je konstrukce korektní, tak reakce působí směrem nahoru v ose Z globálního systému. Kdyby nastal stav, kde jedna z reakcí by směřovala dolů, znamenalo by to, že podpora je ve vzduchu a hrozí převrnutí konstrukce.

V Tab. 6.5.1 lze vidět, že pro všechny zátěžné stavy u všech podpor, jsou reakce v ose Z směřující nahoru. To znamená, že akce působící dolů (tíha) je větší, než klopný moment větru. Konstrukce se nepřevrhne i za působení nesymetrického vlivu ve směru větru. Názorné zobrazení výslednic reakcí od podpor na návěsu je uvedeno na Obr. 6.5.1.

Tab. 6.5.1 – Silové reakce v podporách

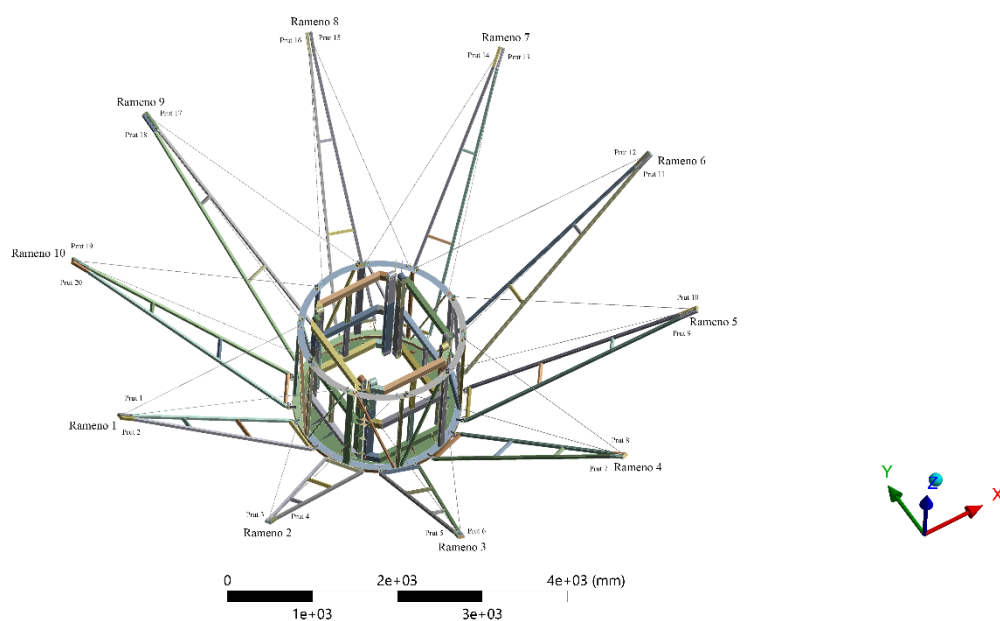
SILOVÉ REAKCE V PODPORÁCH				
Podpory na návěsu	<i>Typy zátěžných stavů</i>			
	Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X
	Silové reakce v ose Z [N]			
Podpora – 1	19021	18250	18261	17563
Podpora – 2	35493	34663	33117	32230
Podpora – 3	21530	23784	20078	21918
Podpora – 4	32676	35908	30572	33328
Podpora – 5	19214	18281	18424	17608
Podpora – 6	38527	34746	35818	32620
Podpora – 7	24340	23681	22619	22190
Podpora – 8	34305	35793	32048	33479



Obr. 6.5.1 – Zobrazení výslednic reakcí od podpor na návěsu

6.5.1.2 SÍLY V PRUTECH RAMEN KORUNY

Dále byly vyhodnoceny silové reakce v prutech ramen koruny. Zjištění těchto sil se může využít pro případné navrhování průměru prutů k zajištění lepší bezpečnosti. Z Tab. 6.5.2 lze pozorovat, že maximální zatěžující síla je v prutu 9, která činí 4004 N při nesymetrickém (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X. Zobrazení ramen a prutů na koruně atrakce je vidět na Obr. 6.5.2.



Obr. 6.5.2 – Zobrazení ramen a prutů na koruně atrakce

Tab. 6.5.2 – Silové působení v prutech

SILOVÉ PŮSOBNÍ V PRUTECH					
Ramena koruny	Pruty	<i>Typy zátěžných stavů</i>			
		Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X
		Silové působení [N]			
Rameno 1	Prut – 1	3830	3828	431	442
	Prut – 2	3761	3760	441	465
Rameno 2	Prut – 3	3813	3821	754	73
	Prut – 4	3775	3767	135	826
Rameno 3	Prut – 5	3809	3815	803	128
	Prut – 6	3776	3773	97	758
Rameno 4	Prut – 7	3818	3806	461	402
	Prut – 8	3764	3780	443	466
Rameno 5	Prut – 9	3831	3816	108	4004
	Prut – 10	3752	3771	795	3556
Rameno 6	Prut – 11	3818	3887	132	3887
	Prut – 12	3764	3827	763	3795
Rameno 7	Prut – 13	3813	3831	427	3654
	Prut – 14	3773	3755	453	3912
Rameno 8	Prut – 15	3822	3837	3959	484
	Prut – 16	3767	3749	3607	398
Rameno 9	Prut – 17	3842	3833	3811	761
	Prut – 18	3750	3754	3747	138
Rameno 10	Prut – 19	3844	3828	3664	813
	Prut – 20	3747	3759	3897	95

6.5.2 ANALÝZA NAPĚTÍ A DEFORMACE

6.5.2.1 NAPĚTÍ

Na všech obrázcích je napětí zobrazeno ve formě pole redukovaného napětí, dle hypotézy HMM. Ze čtyř zátěžných stavů vychází stav plného zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy *Y* jako nekritičtější. Maximální redukované napětí pro tento stav vychází 256 MPa na Obr. 6.5.4 je označeno jako max. Porovnání napětíových špiček je v Tab. 6.5.3.

Stanovení bezpečnosti konstrukce

$$K_k = \frac{R_e}{\sigma_{red_max}} = \frac{355}{256} = 1,39 \quad , \quad (6.5.1)$$

kde:

Re ... mez kluzu materiálu,

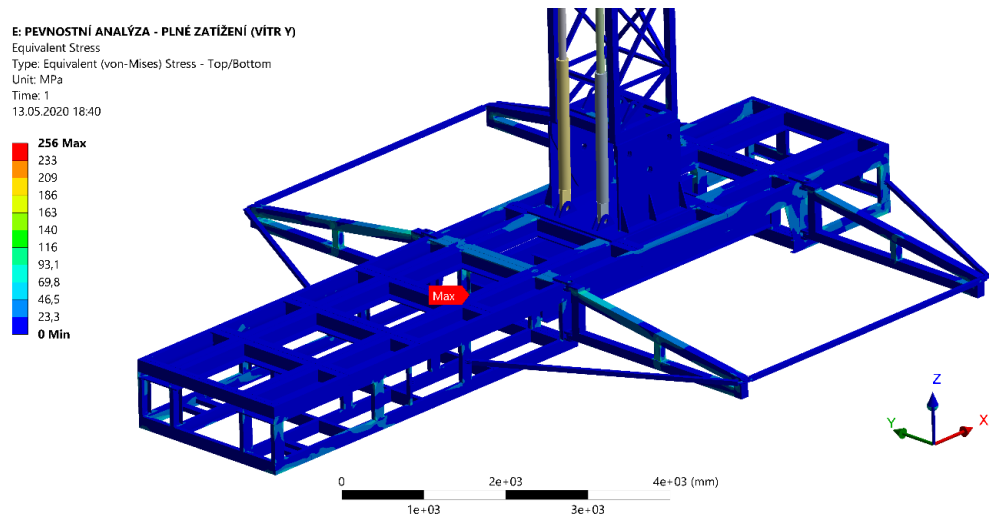
$\sigma_{red-max}$... maximální redukované napětí.

Tab. 6.5.3 – Porovnání napět'ových špiček

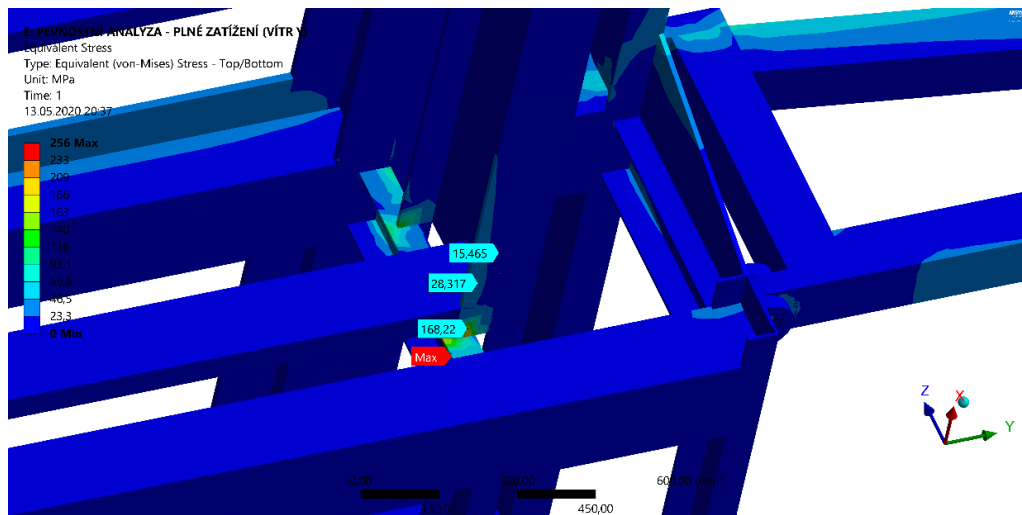
POROVNÁNÍ NAPĚŤOVÝCH ŠPIČEK	
Typy zátěžných stavů	Maximální napětí [MPa]
Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	256
Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	223
Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	236
Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	217

PLNÉ ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y

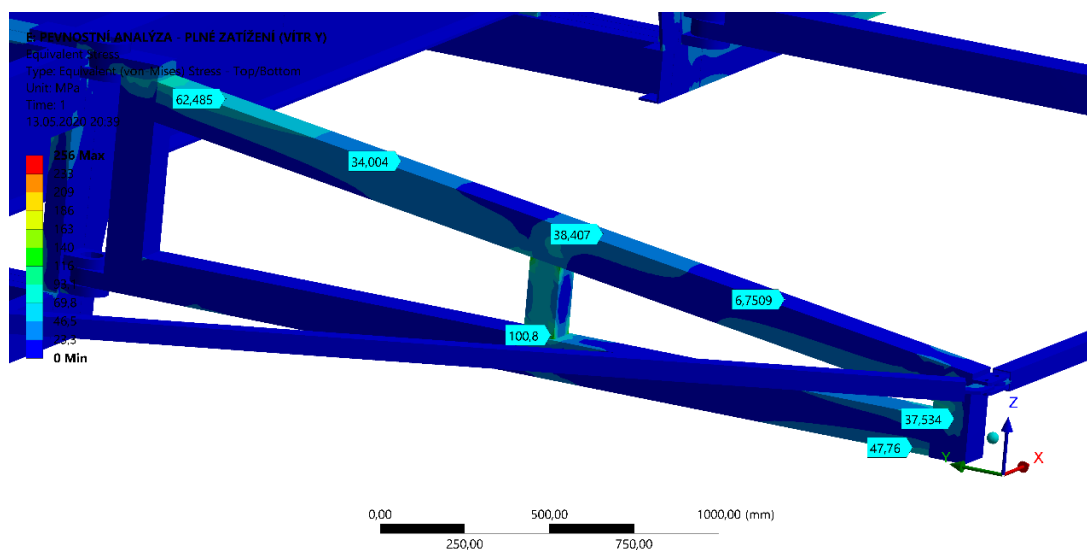
Pole redukovaného napětí podle metody HMH je zobrazeno v Obr. 6.5.3 až 6.5.9. Z Obr. 6.5.3 lze vidět, že napětí v návěsu se pohybuje od 0 do 50 MPa. Extrém se nachází ve spodní části návěsu. V Obr. 6.5.6 u trojúhelníkovém kloubu lze vidět vyšší napětí ve spojovaných částech konstrukce, vniklé od klopného momentu větru.



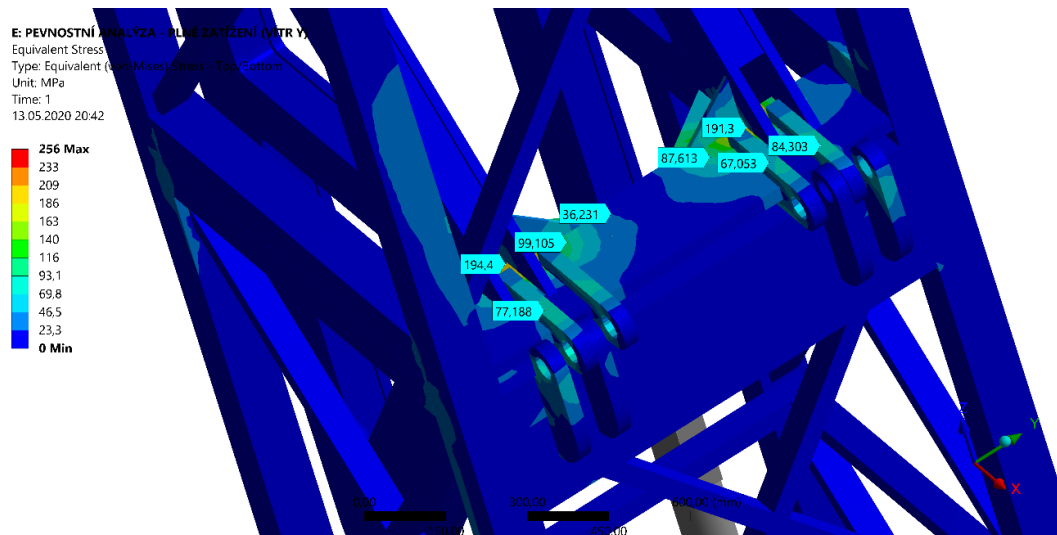
Obr. 6.5.3 – Napětí v návěsu



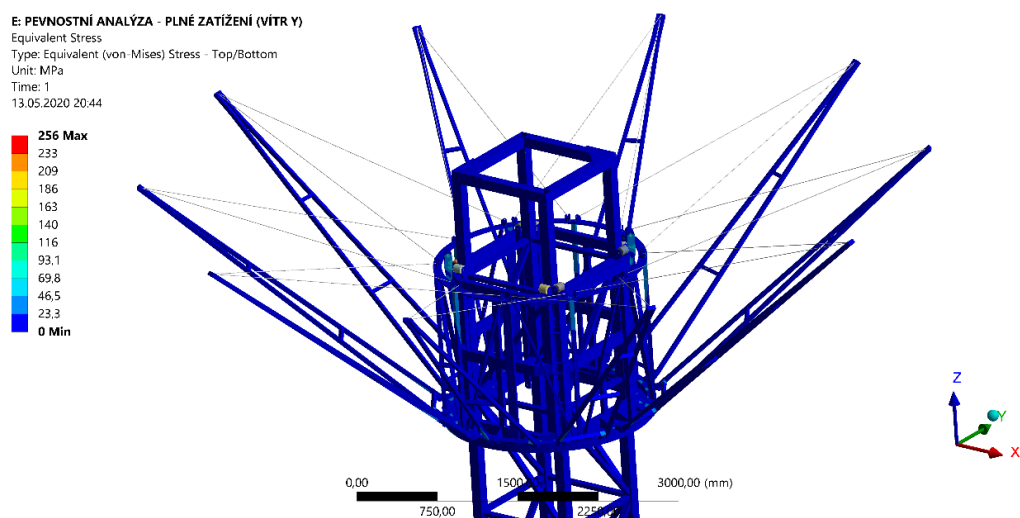
Obr. 6.5.4 – Detail na maximální napětí



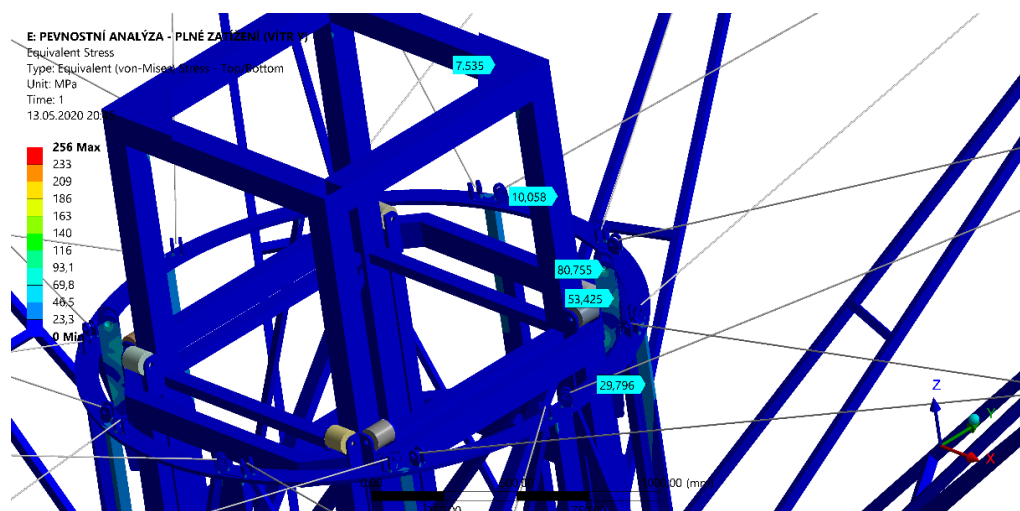
Obr. 6.5.5 – Napětí v noze návěsu



Obr. 6.5.6 – Detail na napětí u trojúhelníkového kloubu



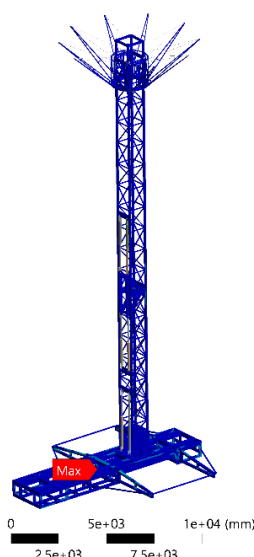
Obr. 6.5.7 – Napětí v koruně atrakce



Obr. 6.5.8 – Detail na napětí koruny atrakce

E: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 13.05.2020 20:46

256 Max
 233
 209
 186
 163
 140
 116
 93,1
 69,8
 46,5
 23,3
 0 Min



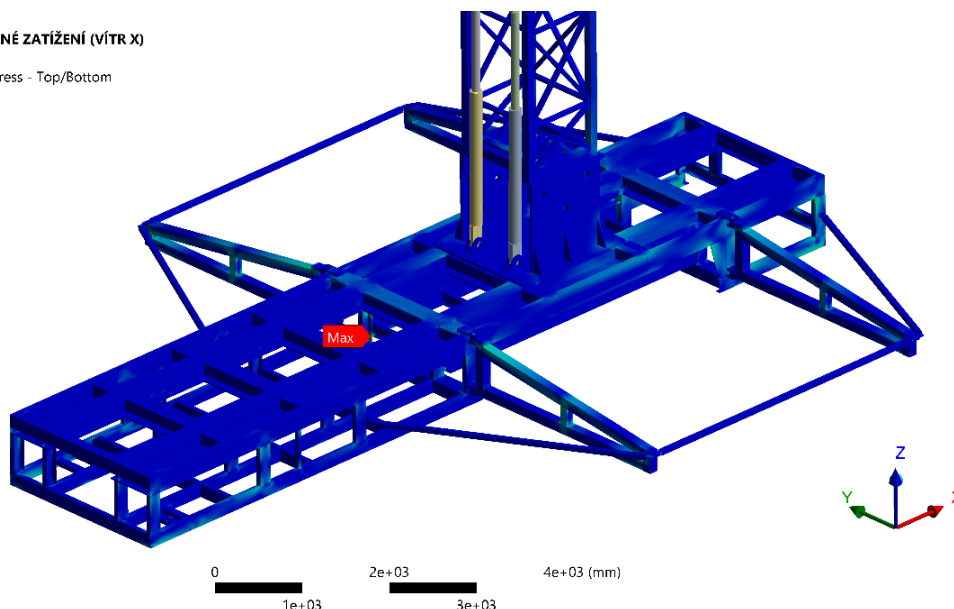
Obr. 6.5.9 – Napětí v celé konstrukci

PLNÉ ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X

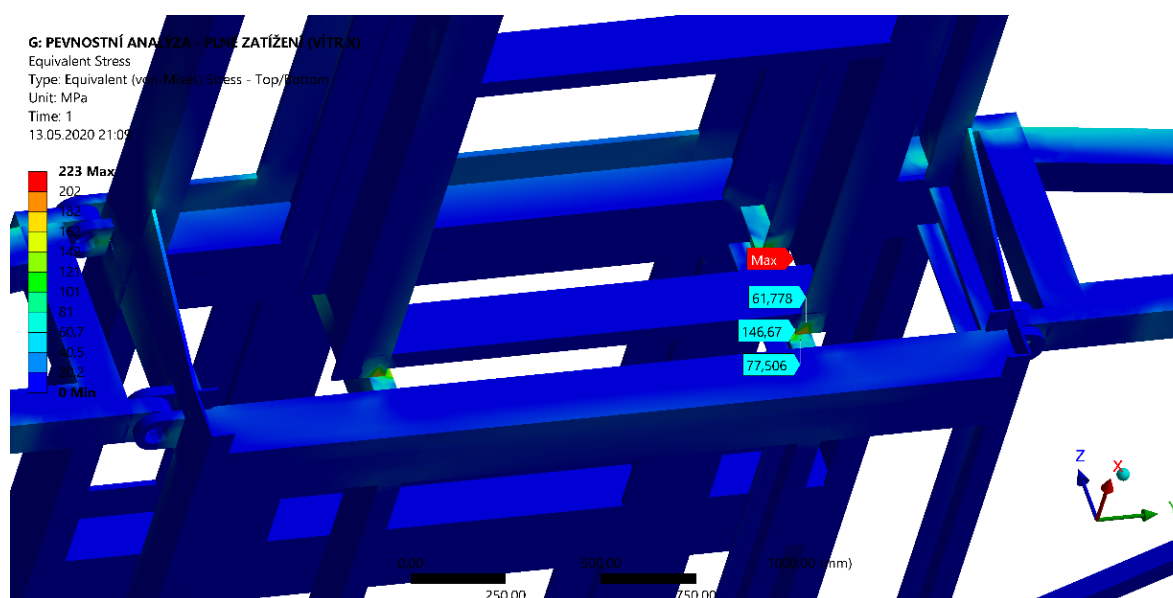
Rozklad pole redukovaného napětí je podobný jako u plného zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y. Jiný směr sil od větru se projeví pouze jako menší extrémní napětí ve stejném místě jako u zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y. Z Obr. 6.5.12 je vidět, že napětí v trojúhelníkovém kloubu se pohybuje od 20 MPa do 200 MPa.

G: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - PLNÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR X)
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 13.05.2020 21:06

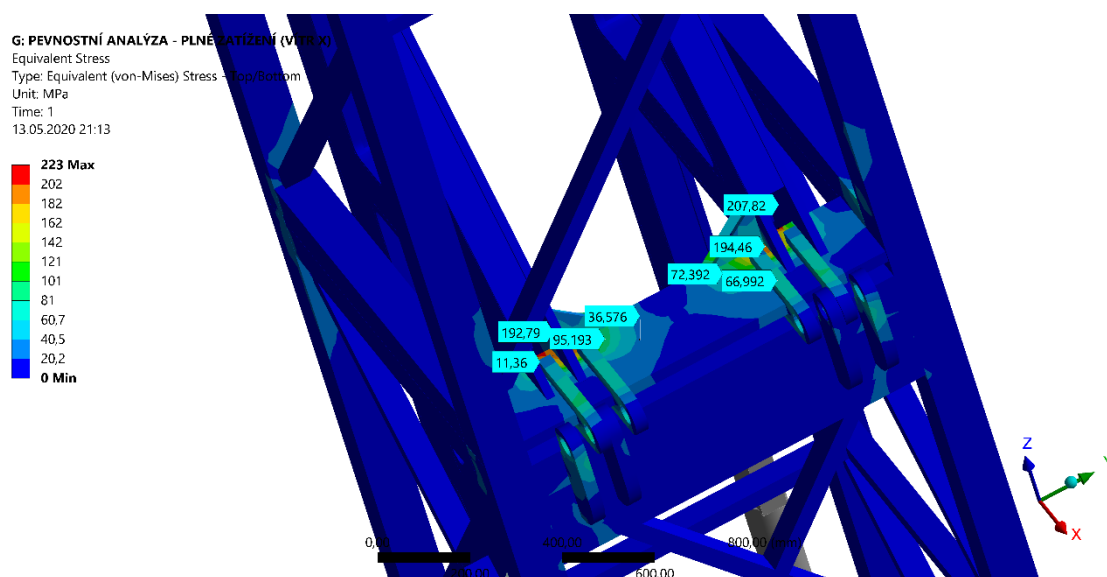
223 Max
 202
 182
 162
 142
 121
 101
 81
 60,7
 40,5
 20,2
 0 Min



Obr. 6.5.10 – Napětí v návěsu



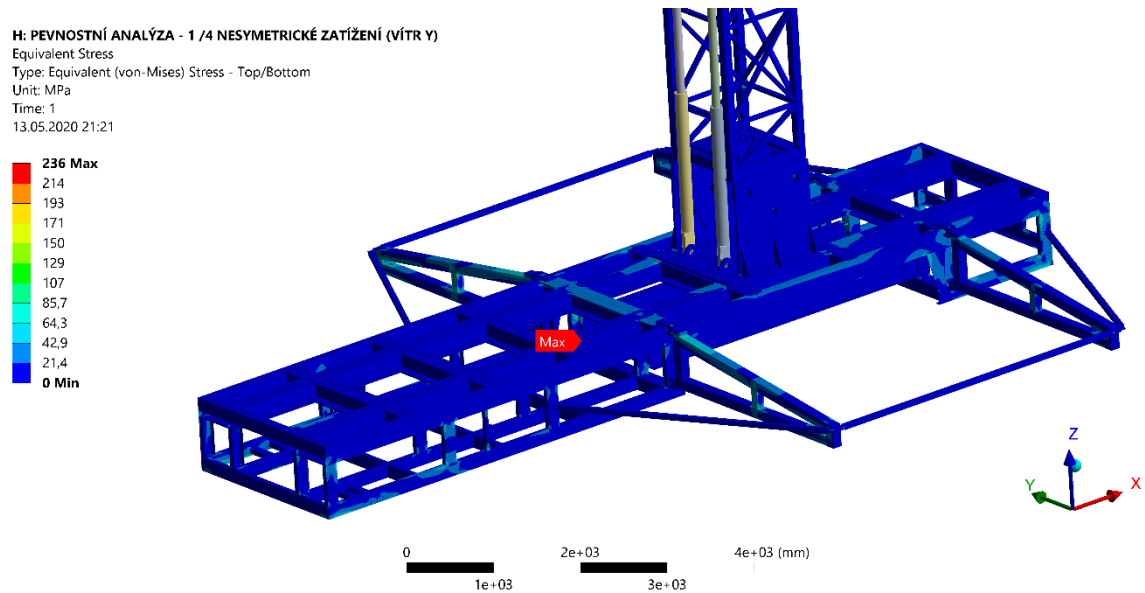
Obr. 6.5.11 – Detail na maximální napětí



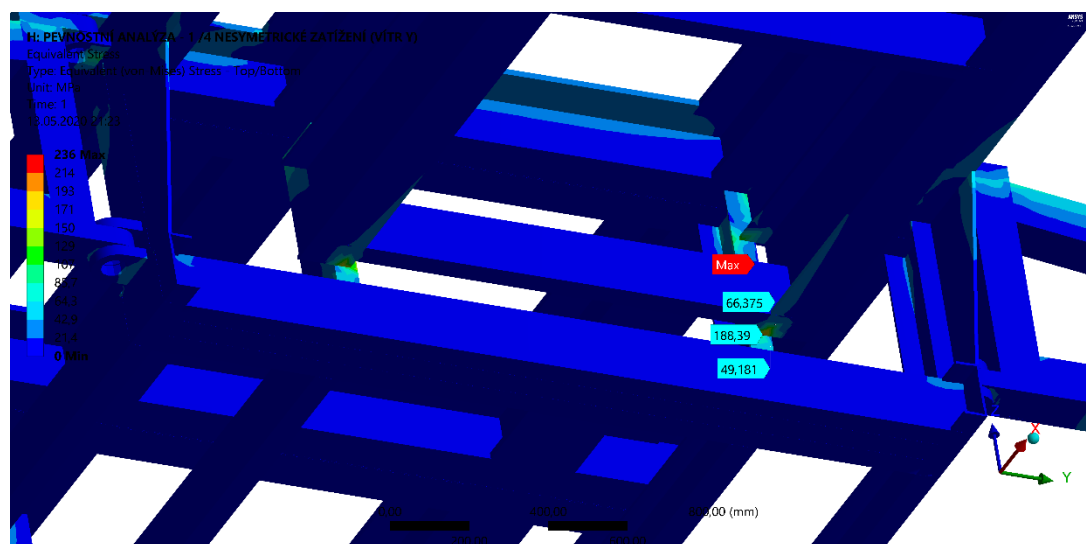
Obr. 6.5.12 – Detail na napětí u trojúhelníkového kloubu

NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y

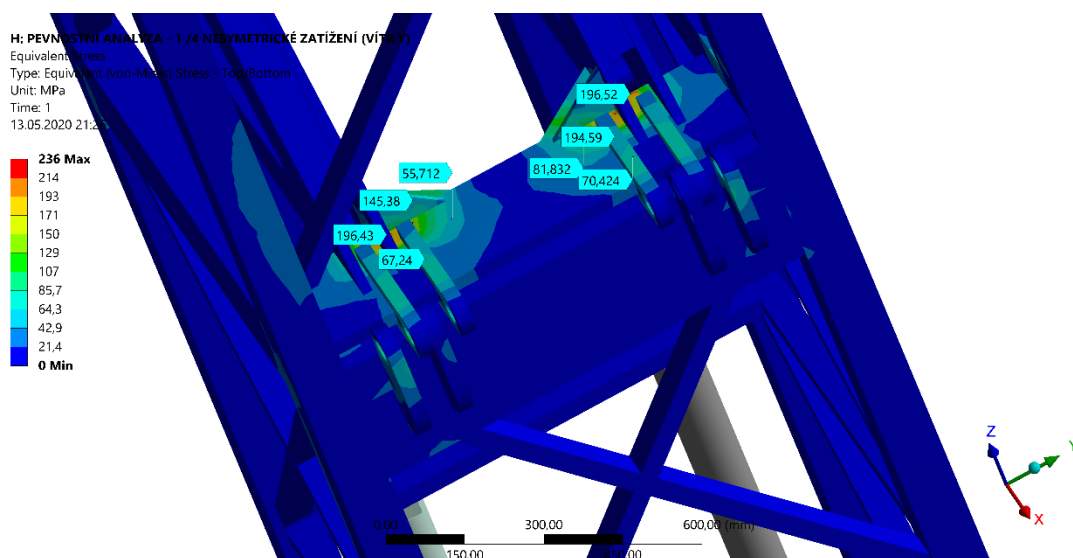
Pro nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y je vidět, že extrém se nachází jako u prvních dvou případů na stejném místě. Napětí v tomto bodě je vyšší než u plného zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X. Je to zapříčiněno stejným směrem nesymetrického zatížení od lidí se směrem větru. Z Obr. 6.5.15 trojúhelníkového kloubu je zřejmé, že napětí se jako u předchozích stavů zatížení pohybuje od 20 MPa do 200 MPa.



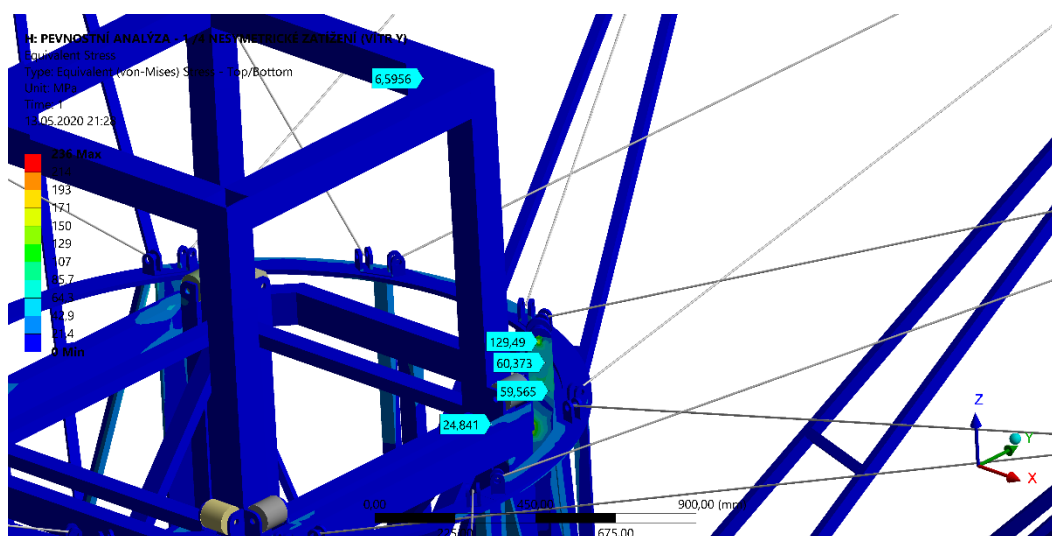
Obr. 6.5.13 – Napětí v návěsu



Obr. 6.5.14 – Detail na maximální napětí



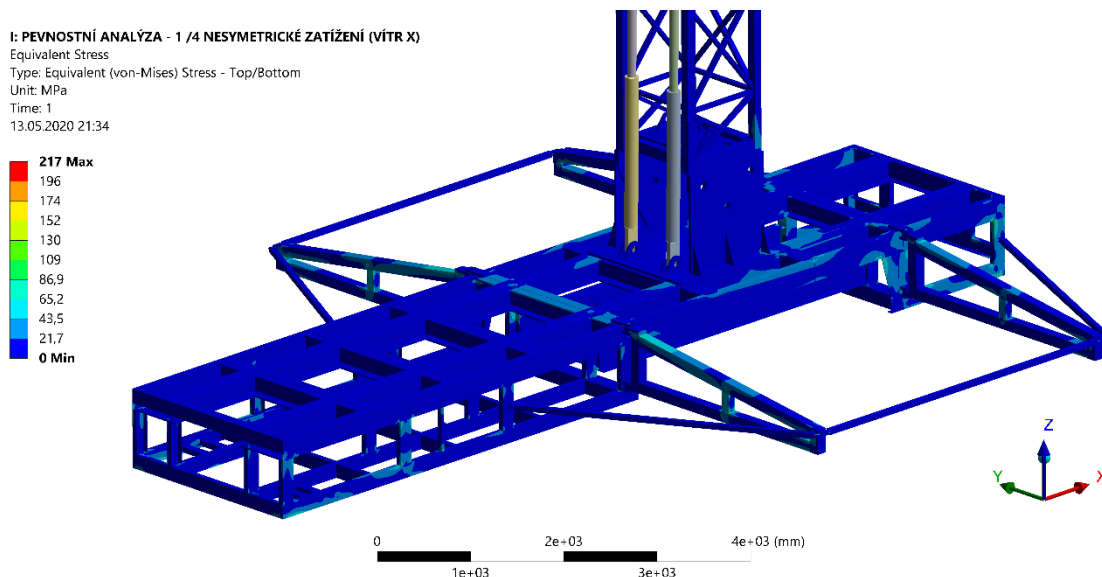
Obr. 6.5.15 – Detail na napětí u trojúhelníkového kloubu



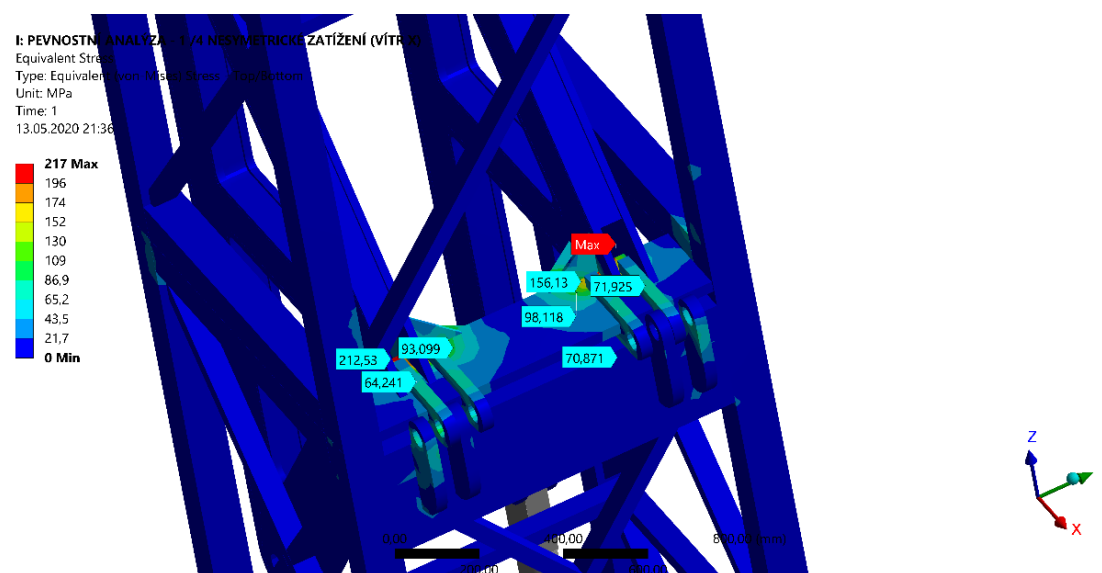
Obr. 6.5.16 – Detail na napětí koruny atrakce

NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X

Pro nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X je vidět, že extrémní redukované napětí se nachází v trojúhelníkovém kloubovém mechanismu označeném jako max. Tento zátěžný stav má nejmenší extrémní redukované napětí ze všech 4 zátěžných stavů.



Obr. 6.5.17 – Napětí v návěsu



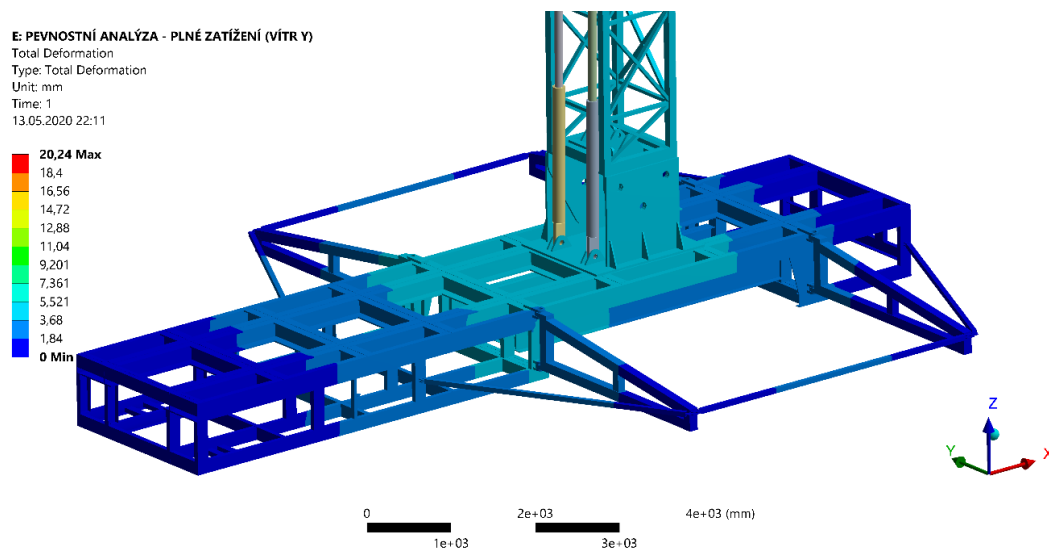
Obr. 6.5.18 – Detail na maximální napětí

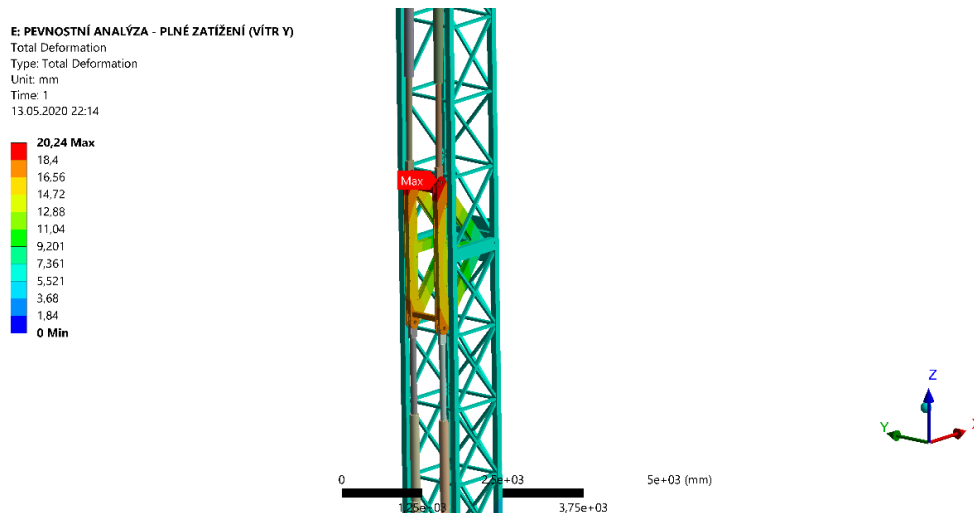
6.5.2.2 DEFORMACE

Maximální deformace pro všechny zátěžné stavy se nachází u plného zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y . Deformace se nachází v trojúhelníkovém kloubovém mechanismu na Obr. 6.5.19 je označeno jako max a hodnota činí 20,24 mm. Porovnání maximálních celkových deformací je v Tab. 6.5.4.

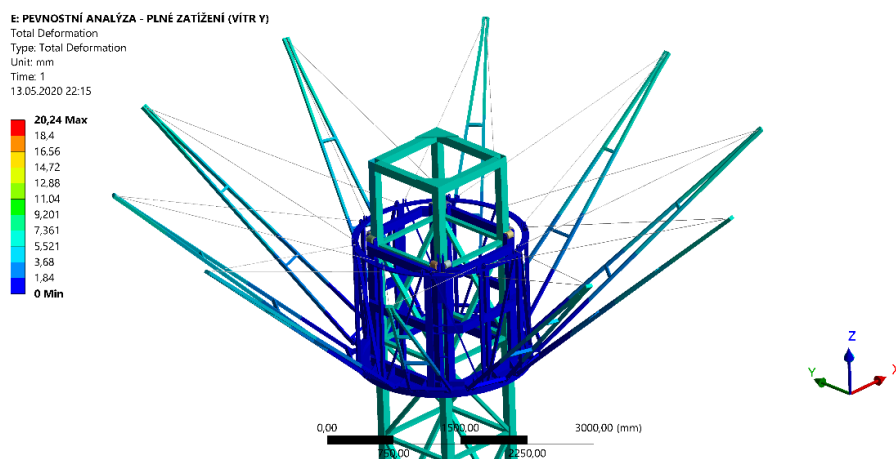
Tab. 6.5.4 – Porovnání maximálních deformací

POROVNÁNÍ MAXIMÁLNÍCH DEFORMACÍ	
Typy zátěžných stavů	Maximální deformace [mm]
Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	20,24
Plné zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	19,52
Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy Y	19,63
Nesymetrické (1/4) zatížení se silovými účinky od větru ve směru osy X	19,12

PLNÉ ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y

Obr. 6.5.19 – Deformace u návěsu

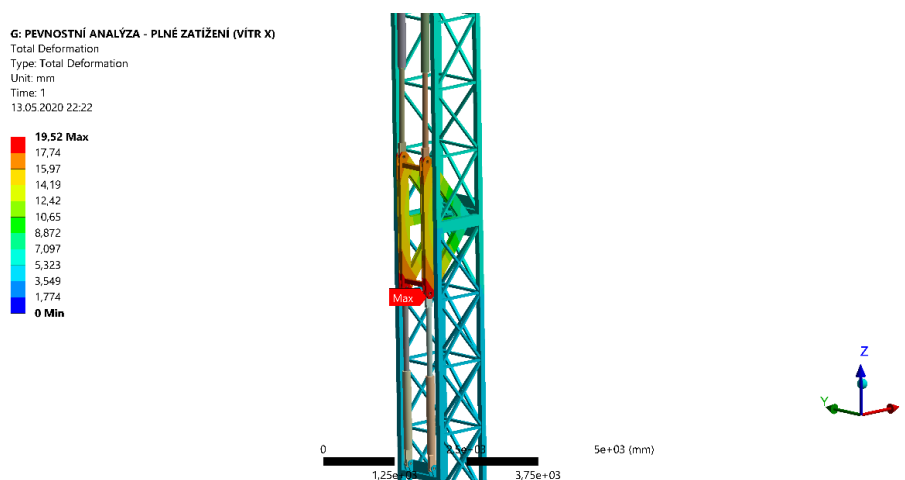


Obr. 6.5.20 – Deformace trojúhelníkového kloubu



Obr. 6.5.21 – Deformace koruny

PLNÉ ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X



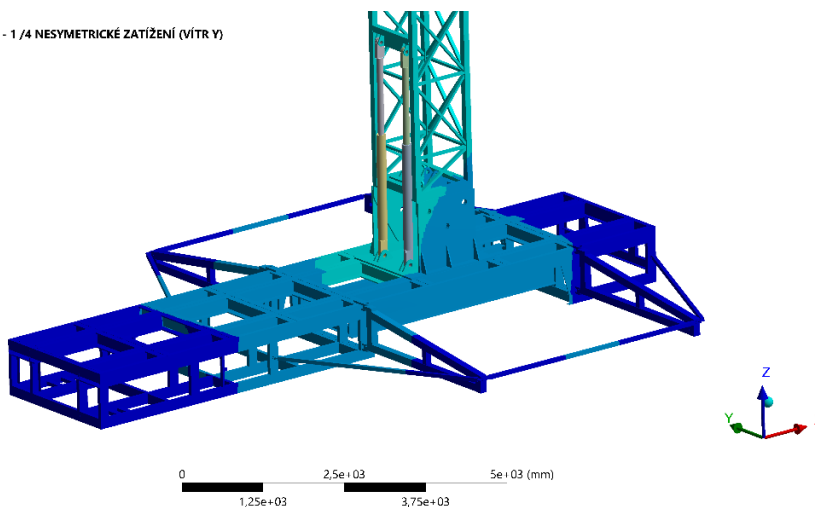
Obr. 6.5.22 – Deformace trojúhelníkového kloubu

NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY Y

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
13.05.2020 22:27

19,63 Max
17,45
15,26
13,08
10,9
8,723
6,542
4,361
2,181
0 Min



Obr. 6.5.23 – Deformace u návěsu

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
13.05.2020 22:28

19,63 Max
17,45
15,26
13,08
10,9
8,723
6,542
4,361
2,181
0 Min

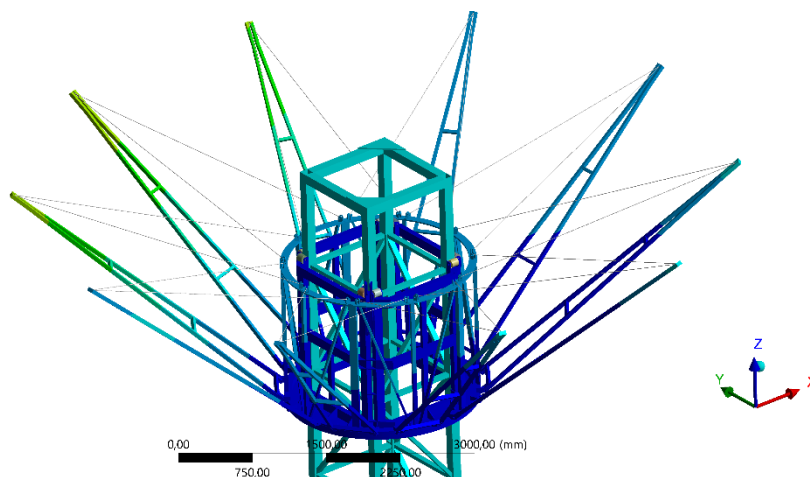


Obr. 6.5.24 – Deformace trojúhelníkového kloubu

H: PEVNOSTNÍ ANALÝZA - 1 /4 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ (VÍTR Y)

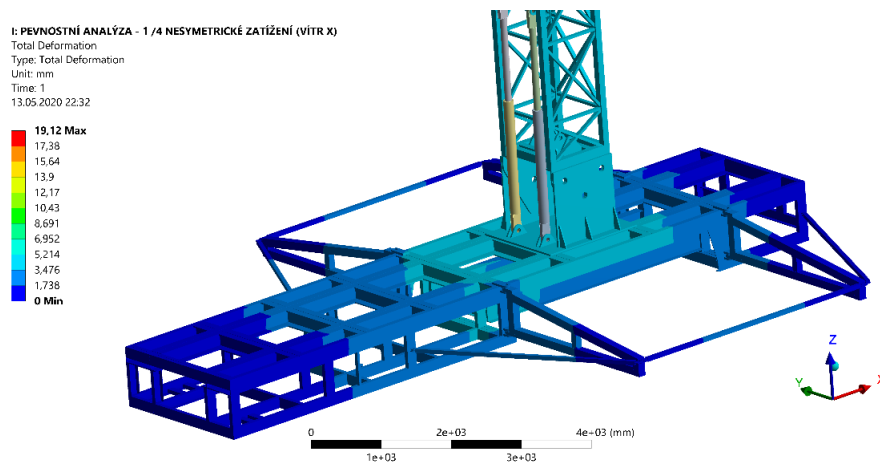
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
13.05.2020 22:29

19,63 Max
17,45
15,26
13,08
10,9
8,723
6,542
4,361
2,181
0 Min

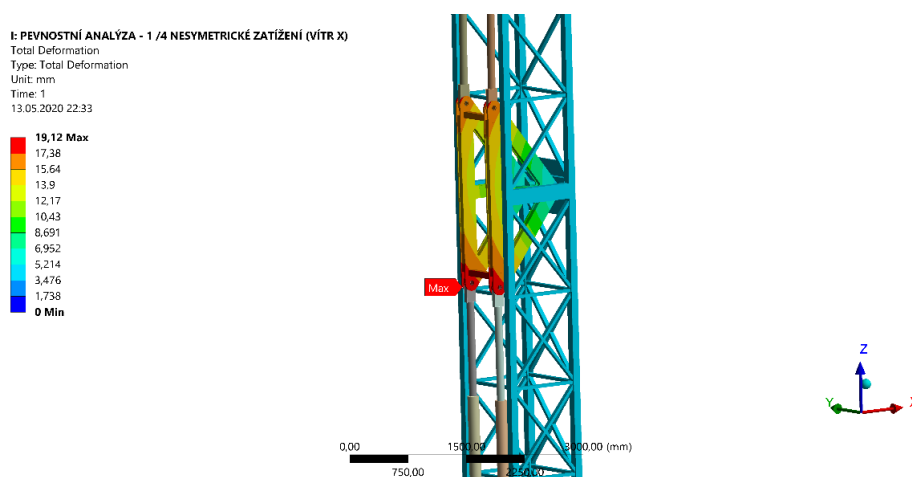


Obr. 6.5.25 – Deformace koruny

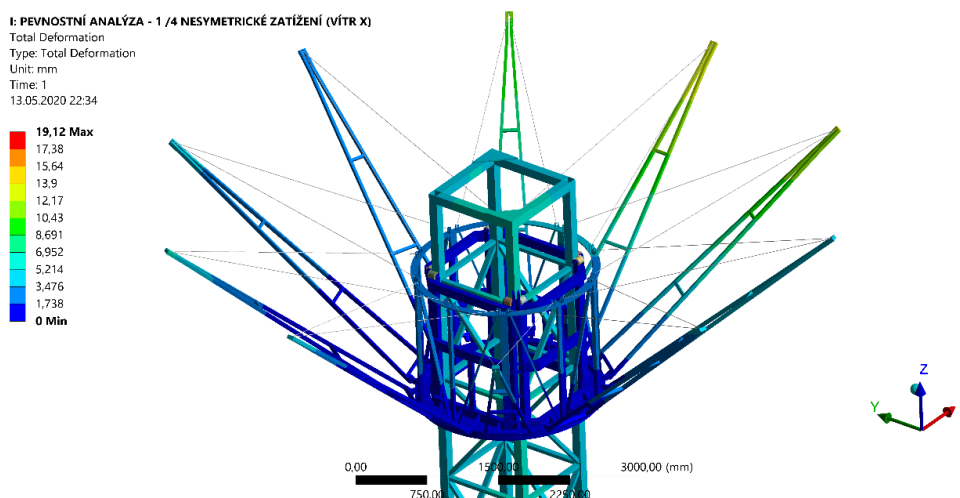
NESYMETRICKÉ (1/4) ZATÍŽENÍ SE SILOVÝMI ÚČINKY OD VĚTRU VE SMĚRU OSY X



Obr. 6.5.26 – Deformace u návěsu



Obr. 6.5.27 – Deformace trojúhelníkového kloubu



Obr. 6.5.28 – Deformace koruny

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracování napěťově – deformační analýzy zábavní atrakce. Prvním krokem pro řešení napěťově – deformační analýzy bylo seznámení s obsahem normy ČSN EN 13814 a následným vypracováním postupu řešení atrakce.

Podle normy ČSN EN 13814 byly stanoveny 4 zátěžné stavy pro analýzu. Norma dále stanovuje hodnotu zatížení od lidí na konstrukci s přiřazenou bezpečností. V kap. 3 bylo popsáno, jaké bezpečnosti podléhají trvalá zatížení, např. konstrukce zábavní atrakce. Bylo stanoveno, že maximální rychlost větru působící na konstrukci je $V_{\text{ref}} = 15 \text{ m/s}$, přesáhne-li vítr tuhle hodnotu, provozování atrakce se zastaví. Pro výpočet sil způsobené od větru norma ČSN EN 13814 odkazuje na normu ČSN EN 1991-1-4.

Norma ČSN EN 1991-1-4 stanovuje, jakou silou působí vítr na konstrukci. Obsahem této normy je mapa větrných oblastí v ČR, podle které byla zvolena oblast kategorie III s rychlostí větru $v_{b,0} = 27,5 \text{ m/s}$. Z této rychlosti větru a parametrů konstrukce bylo vypočteno zatížení větrem na věži $F_{w1} = 15920 \text{ N}$ a na korunu atrakce $F_{w2} = 3832 \text{ N}$. Stření rychlost a síla roste s funkcí výšky konstrukce. Vypočtená síla na věž není konstantní, jak je zavedeno ve výpočtu, ale parabolicky rostoucí. Zavedením nejvyšší vypočtené síly (konstantní po celé délce na věž), vzniká větší klopný moment od síly větru.

Zvolením vyšší rychlosti větru kategorie III působící na konstrukci při provozu a zavedením nejvyšší síly od větru (konstantní po celé délce na věž), byly vytvořeny podmínky, které nemohou nastat. Vyhovující výsledky z pevnostní analýzy jsou bezpečnější.

Analýza celé konstrukce zábavní atrakce, byla provedena metodou konečných prvků v softwaru *ANSYS Workbench R19*.

Na základě dodané geometrie modelu zábavní atrakce, byl vytvořen zjednodušený model pro zpracování metodou konečných prvků. Zjednodušený model byl vytvořen ze skořepinových prvků. Skořepinový model umožnil přesný a rychlý výpočet.

Pevnostní analýza se týkala příhradové konstrukce mechanismu kolotoče. Zbylé konstrukční prvky nebyly zahrnuty do analýzy. Tyto konstrukční části jsou zavedené formou okrajových podmínek na konstrukci, např. (kladkostroj, čepy, ložiska, šrouby, sedačky atd.).

Na základně vytvořeného modelu s okrajovými podmínkami, byly zkoumány 4 zátěžné stavy. Nejkritičtější stav nastal při plném zatížení s působícím větrem v ose Y, zde dosáhlo vypočtené maximální redukované napětí podle hypotézy HMH 256 MPa a maximální deformace 21 mm . Dále byly zjištěny reakce od podpor na návěsu. Všechny vypočtené reakce podpor u všech zkoumaných zátěžných stavů, směřují směrem nahoru

v ose Z globálního souřadnicového systému, proti tíze konstrukce. Konstrukce se tedy nepřevrhne od klopného momentu větru.

Konstrukce je pevnostně vyhovující i pro zpřísněné zatěžující podmínky s bezpečností $K_k = 1,39$. Z napětíové – deformační analýzy lze uvažovat i o jiných materiálech, které mají menší mez kluzu např. S275JR a to z důvodu předimenzování konstrukce.

8 PODĚKOVÁNÍ

Především bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Porubovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky, čas věnovaný při konzultacích i vzdálenou pomoc při distančním studiu. Dále bych chtěl poděkovat své vlídné rodině a přátelům za podporu, pochopení a trpělivost, kterou se mnou měli při studiu i vypracování bakalářské práce.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 13814. *Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky - Bezpečnost*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2005.
- [2] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007.
- [3] COOK, Robert D. *Finite element modeling for stress analysis*. Hong Kong: John Wiley, 1995. ISBN 04-711-0774-3.
- [4] ANSYS® *Academic Teaching Advanced, Release R19.2, help system, ANSYS, Inc.*

INTERNETOVÉ ZDROJE:

- [5] Air Flyer Swing Tower. | Big Rock Amusements Air Flyer in mo... | Flickr. Find your inspiration. | Flickr [online]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/27847413@N00/37100050651>.
- [6] Structural Steel - EN10025 S275, S355JR and S355JO. Sell various grades of steel plates with competitive price [online]. Copyright © [cit. 16.05.2020]. Dostupné z: <http://www.steelplatesforsale.com/blog/S355JR-steel-plate.html>
- [7] Hooke's Law - Elasticity of Materials. Nuclear Power for Everybody - What is Nuclear Power [online]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-science/material-properties/strength/hookes-law/>